

**Optimização do Processo de Secagem *Hot Oil Spray* em
Componentes de Transformadores e Contribuição no Processo de
Produção**

Efacec Energia

José Manuel Fernandes da Silva

Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM

Orientador na Efacec: Engenheiro Miguel Gonçalves

Orientadores na FEUP: Prof. Mário Vaz e Prof. Paulo Tavares de Castro



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2008

Pouco conhecimento faz com que as criaturas se sintam orgulhosas.

Muito conhecimento, que se sintam humildes.

É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o céu enquanto que as cheias a baixam para a terra, sua mãe.

Leonardo da Vinci.

Resumo

Os transformadores representam elementos de ligação muito importantes dentro de um sistema de energia eléctrica. A interrupção do funcionamento de um transformador pode provocar a paralisação de parte de uma fábrica ou de uma subestação.

As falhas que normalmente provocam a retirada de um transformador de serviço podem ocorrer por solicitações excessivas em serviço ou mesmo em condições normais de operação, por deficiência de manutenção ou envelhecimento do equipamento.

Estes equipamentos são constituídos basicamente de um núcleo com bobinas de cobre isoladas com papéis especiais e preenchido com óleo isolante que com o decorrer do tempo se deterioram.

A presença de humidade no interior do transformador provoca o decréscimo da resistência eléctrica do óleo e do papel e principalmente da resistência mecânica deste. Por exemplo, sempre que o teor de água duplica, a resistência mecânica do papel é reduzida a metade.

O presente trabalho teve por objectivo melhorar o tratamento standard utilizado na secagem de elementos de um transformador por *Hot Oil Spray*. O trabalho focalizou-se na área dos Transformadores Core. Foram efectuados ensaios e comparações entre o tratamento utilizado, denominado *Standard*, e um novo a que denominados *Termo-Spray*, de modo a que as modificações fossem validadas para serem utilizadas permanentemente no dito processo de secagem.

Para além deste trabalho principal, também foi realizada uma contribuição no processo de produção. Esse trabalho consistiu em assimilar o correcto funcionamento e saber programar uma máquina que produz calços para na eventualidade de uma avaria não haver necessidade de chamar o técnico do fornecedor da máquina.

O estágio permitiu a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos durante o Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, o conhecimento da realidade do meio industrial, em especial dos processos de secagem de transformadores assim como todo o processo de produção de transformadores e o enriquecimento em termos pessoais e profissionais.

Optimization of the Drying Process Hot Oil Spray in Transformers Components and Contribution to Production Process

Abstract

The transformers represent very important elements of connection within a system of power supply. The interruption of the operation of a transformer can cause the paralysis of a factory or a substation.

The faults that usually cause the removal of a service transformer may occur by excessive service demands or even in normal operation conditions, by aging or disability of equipment maintenance.

This equipment consists basically of a core with coils of insulated copper with special paper and filled with insulating oil which over time is deteriorating.

This study aimed to improve the standard treatment used in drying of transformer elements by Hot Oil Spray. The work focused on the Core Transformers area. Tests and comparisons were made between the treatment used normally, called Standard, and the new one that we called Thermo-Spray, so that these changes be validated for use permanently in the drying process.

Apart from this main work, a contribution in the production process was also carried out. That work plan was to assimilate the proper functioning and program the pads machine in the event of a failure without the need to call the technical supplier.

The internship allowed the practical application of the knowledge acquired during the Integrated Masters in Mechanical Engineering, and the acquisition of knowledge of the reality of business environment, particularly the process of transformers drying and the entire process of transformers production and personal and professional enrichment.

Agradecimentos

Agradeço a todos os colaboradores da Efacec Energia, que se dispuseram a partilhar o seu conhecimento e experiência, contribuindo directamente para o sucesso do trabalho realizado.

Ao Engenheiro Miguel Gonçalves, orientador de estágio da Efacec Energia, gostaria de agradecer pela motivação e conhecimento partilhado.

Ao Engenheiro Anacleto Cardoso agradeço o conhecimento partilhado necessário para a execução do projecto.

Ao Professor Paulo Tavares de Castro e ao Professor Mário Vaz, orientadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, gostaria de agradecer pela disponibilidade e pelo auxílio prestado na realização do projecto.

Desejo igualmente agradecer à minha família, amigos e colegas de trabalho pelo apoio e conforto proporcionados durante todo tempo de mestrado e estágio.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Efacec	2
1.1.1. Organigrama do Grupo Efacec	4
1.1.2. A Efacec em 2007	5
1.1.3. Marcos Históricos	7
1.1.4. Efacec Energia	11
1.1.5. Concorrentes no mercado internacional dos transformadores de potência 12	
1.2. Transformadores de potência	12
1.2.1. Constituição de um transformador	12
1.2.2. Elementos acessórios	13
1.2.3. Princípio de funcionamento	14
1.2.4. Esforços de Curto-Circuito	15
1.2.4.1. Condutores paralelos	15
1.2.4.2. Transformadores tipo Core	15
1.2.5. Estrutura Isolante	18
1.2.5.1. Identificação dos componentes isolantes nos Transformadores Core 18	
1.2.6. Medidas para o êxito de uma estrutura isolante	19
1.2.7. Circuito magnético	19
1.2.7.1. Juntas dos núcleos	20
1.2.8. Óleo Isolante	21
1.2.8.1. Função do óleo no transformador:	21
1.2.8.2. Aquecimento do transformador em funcionamento	21
1.2.8.3. O transformador aquece, mas não indefinidamente	21
1.2.8.4. Como um corpo perde calor	21
1.2.8.5. Transformador em funcionamento	22
1.2.8.6. Limitação do aquecimento do transformador	23
1.2.8.7. Presença de humidade e impurezas sólidas no óleo	24
1.2.9. Áreas de produção dos Transformadores Core	24
1.2.10. Diferentes fases até à conclusão de um Transformador Core	27
1.2.11. Síntese das etapas de produção de um transformador	28
2. Processos de Secagem	31
2.1. Métodos de Secagem	32
2.1.1. Sistema de isolamento “Óleo – Papel”	34
2.1.1.1. Agentes de degradação do papel	35
2.1.1.2. Agentes de degradação do óleo isolante	37
2.1.1.3. Classificação do óleo do transformador	40
2.1.1.4. Parâmetros controlados e valores limite	40
2.2. Processos de secagem de transformadores de potência	41
2.2.1. Secagem por Circulação de Ar Quente	41
2.2.2. Secagem por Circulação de Ar Quente Seguida de Vazio	41
2.2.3. Secagem por Circulação de Óleo Quente e Vazio	41
2.2.4. Secagem por “ <i>Hot Oil Spray</i> ”	42
2.2.5. Secagem por <i>Vapour-Phase</i>	42
2.3. Processo de secagem de milho	44
2.4. Processo de Secagem por <i>Hot Oil Spray</i>	45
2.4.1. Estação de secagem por <i>Hot Oil Spray</i>	45
2.4.2. Descrição dos processos:	47

2.4.3. Quadros síntese para o processo de secagem <i>Standard</i> por <i>Hot Oil Spray</i>	49
2.4.4. Esquema de princípio da instalação de secagem por <i>Hot Oil Spray</i>	50
3. Procedimentos experimentais	53
3.1. Objectivos	53
3.2. Quadros síntese para o processo de secagem <i>Termo Spray</i> por <i>Hot Oil Spray</i>	53
3.3. Preparação dos ensaios	55
3.3.1. Ensaio 1: Processo de secagem <i>Standard</i>	55
3.3.1.1. Preparação dos provetes	55
3.3.1.2. Preparação da bobina	56
3.3.1.3. Resultados obtidos	57
3.3.2. Ensaio 2: Processo de secagem <i>Termo-Spray</i>	64
3.3.2.1. Preparação dos provetes	64
3.3.2.2. Preparação da bobina	64
3.3.2.3. Resultados obtidos	66
3.4. Discussão de resultados	72
4. Prensa de excêntrico com embraiagem mecânica de ataque directo	73
4.1. Objectivo	73
4.2. Características gerais e dimensões gerais	74
4.3. Atravancamento	75
4.4. Dimensões gerais e das fundações	76
4.5. Condições ambientais	77
4.6. Verificações	77
4.7. Comandos, protecção e funcionamento ou iniciação	78
4.7.1. Placas sinaléticas	78
4.7.2. Modos de funcionamento	78
4.7.2.1. CAP “comando por pedal”	79
4.8. Regulações e fixação da ferramenta	79
4.8.1. Regulações	79
4.8.2. Regulação de curso	79
4.8.3. Regulações da corredeira "carro"	80
4.8.4. Embraiagem mecânica e freio (desencravamento)	82
4.8.4.1. Embraiagem mecânica	82
4.8.4.2. Desencravamento	83
4.8.5. Freio	84
4.9. CAP	86
4.9.1. Introdução	86
4.9.2. Descrição do funcionamento da unidade	86
4.9.2.1. 18.3.1 Menu principal	86
4.9.2.2. Configuração do alimentador	87
4.9.2.3. Entradas e saídas do PLC	87
4.9.2.4. Funcionamento manual	88
4.9.2.5. Programação do sistema	88
5. Conclusões	93
6. Referências Bibliográficas	95
Glossário	97
ANEXO A: Curvas de equilíbrio da humidade	99

ANEXO B: Diagramas do processo <i>Standard</i>	103
ANEXO C: Diagramas do processo <i>Termo-Spray</i>	105

1. Introdução

O tempo de vida de um transformador depende essencialmente do seu sistema de isolamento constituído por óleo isolante e papel isolante, mas principalmente deste último – isto porque, enquanto é relativamente fácil efectuar a substituição do óleo (que pode ocorrer várias vezes no decurso da vida de um transformador) o mesmo não se passa com o isolamento sólido [1].

Podemos mesmo dizer que o nível de envelhecimento⁷ de um transformador corresponde ao nível de degradação atingida pelo isolamento sólido, sendo portanto a vida útil restante do transformador, directamente medida pela vida útil restante do isolamento sólido [1].

Os transformadores de potência são equipamentos importantes de alto custo no contexto dos sistemas eléctricos de potência. São máquinas estáticas que transferem energia eléctrica de um circuito para outro, mantendo a mesma frequência e, normalmente, variando valores de corrente e de tensão. De uma maneira geral, a função de um transformador é a de reduzir as perdas em transmissão por redução da corrente requerida para transmitir uma determinada potência eléctrica. Esta transferência de energia é acompanhada de perdas que dependem, normalmente, da construção do transformador, do seu regime de funcionamento e da sua manutenção.

A principal parte de um transformador é o seu regime de isolamento, que é constituído, basicamente, por um líquido, o óleo mineral isolante e um isolamento sólido, o papel isolante eléctrico. Na Figura 1, é mostrado um esquema de um núcleo de transformador, ilustrando o uso do papel.

Durante o funcionamento dos transformadores de potência vários processos de desgaste e de envelhecimento ocorrem no sistema de isolamento.

Os efeitos de fadiga térmica, química, eléctrica e mecânica, tais como, pontos quentes, sobre-aquecimentos, sobre-tensões e vibração são responsáveis por alterações do sistema isolante e devem ser monitorizados para garantir a eficiência do equipamento, permitindo intervenções de manutenção preditiva, a fim de evitar paragens da máquina e, consequentemente, aumento de custos.

Dessa forma, a diminuição da vida útil dos transformadores está relacionada com a qualidade dos materiais dieléctricos utilizados durante o processo de fabricação. O estabelecimento de um programa de supervisão e manutenção preditiva e preventiva, pelo conhecimento dos materiais dieléctricos envolvidos, proporcionará um aumento na vida útil do equipamento em serviço.

A presença de humidade no papel deteriora o isolamento do papel no transformador através da redução da resistência mecânica e eléctrica. O efeito da humidade num transformador é regido por uma simples lei: a taxa de degradação térmica do papel é proporcional ao seu conteúdo de água. A presença da humidade no papel e óleo é tão crítico na vida de um transformador que as investigações começaram em 1920 [5].

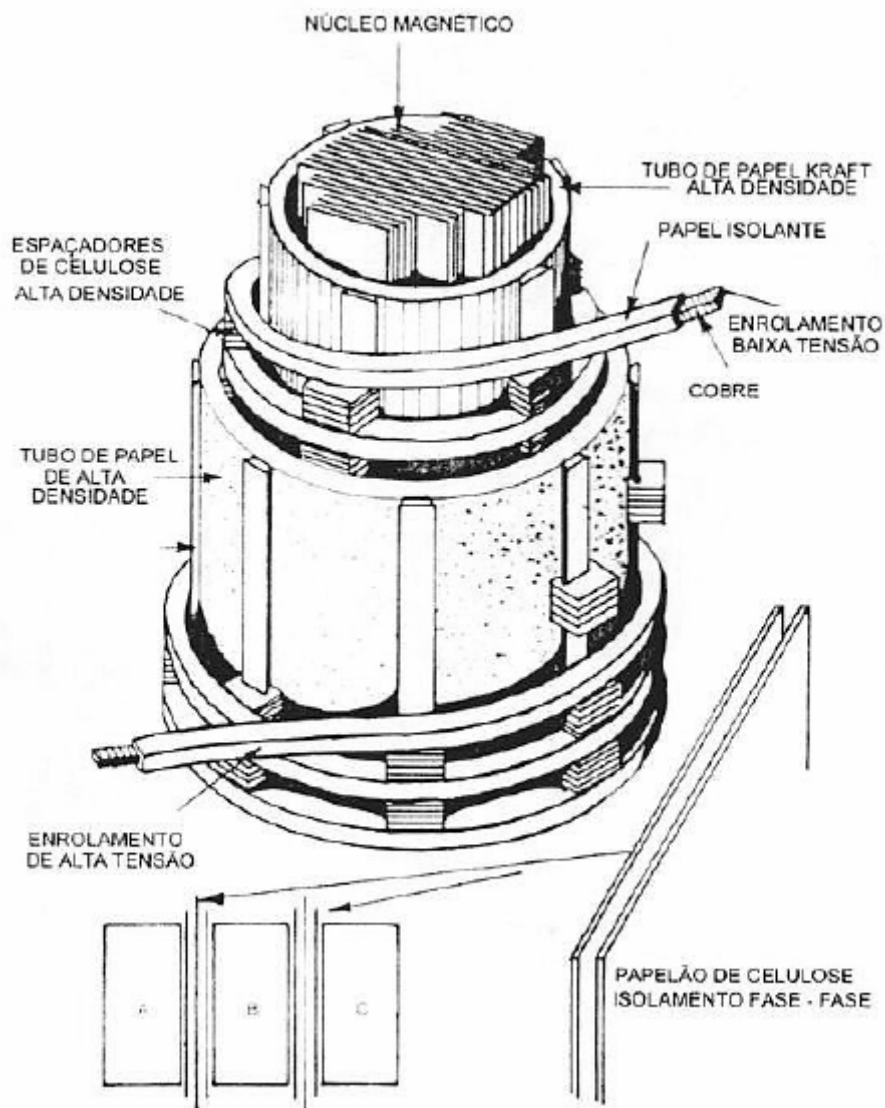


Figura 1 – Detalhe do núcleo de um transformador

1.1. Efacec

O nome Efacec (Figura 2) é familiar à maioria dos Portugueses, nomeadamente devido ao sucesso dos seus produtos soluções, sistemas e serviços. Porém, a acção do Grupo Efacec desenvolve-se por muitas outras áreas igualmente fundamentais ao desenvolvimento da nossa sociedade [16].



Figura 2 – Novo símbolo da Efacec

O Grupo Efacec, maior Grupo Eléctrico Nacional de capitais portuguesas, tem cerca de 3000 colaboradores e uma facturação aproximada de 400 Milhões de Euros, estando presente em mais de meia centena de países e exportando aproximadamente metade da sua produção [16].

Respeitando a sua tradição, o Grupo Efacec aposta continuamente na satisfação dos seus Colaboradores, desenvolvendo e apoiando diversas actividades que vão muito além das obrigações contratuais e legais, bem como diversas disposições e regras que procuram criar e desenvolver um ambiente justo, agradável, respeitador do ambiente e perfeitamente enquadrado na comunidade.

O portfolio de actividades da Efacec,
Soluções para Energia;
Soluções para Transportes e Logística;
Soluções de Engenharia e Serviços;

sustenta uma abordagem Sistemista/Integradora, satisfazendo as necessidades actuais de mercado e rentabilizando as várias valências do Grupo.

A aposta da Efacec no mercado Internacional, bem como um forte investimento na Inovação e no desenvolvimento de novas tecnologia, em articulação com as tecnologias de base, fazem com que a Efacec tenha sabido impor-se no mercado, posicionando-a na linha da frente da indústria portuguesa e nos mercados internacionais [16].

Estes factores são a base para o crescimento e desenvolvimento sustentados do Grupo Efacec.

1.1.1. Organograma do Grupo Efacec

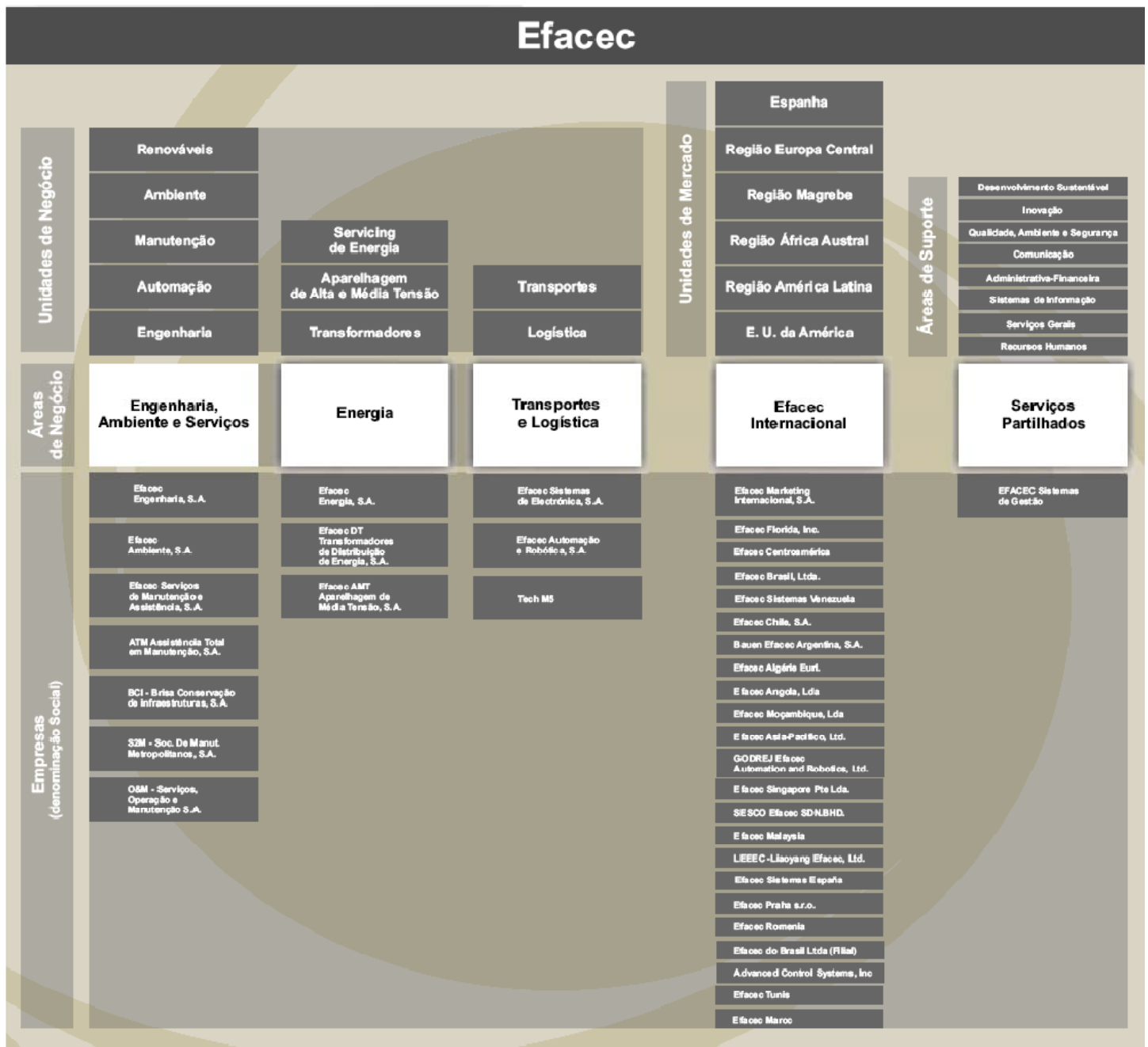


Figura 3 – Organograma da Efacec [16]

1.1.2. A Efacec em 2007

A nova fase de desenvolvimento da Efacec, centrada na concretização do potencial de crescimento da empresa, em especial através do reforço claro do seu processo de internacionalização, marcou transversalmente o ano 2007.

Na persecução dos seus objectivos fundamentais, a Efacec manteve o foco numa gestão económica e financeira de elevado rigor, procurando aprofundar e implementar, nestas matérias, mecanismos assentes em padrões de excelência contínua, o que, inequivocamente, contribuiu para o desempenho positivo atingido em 2007.

Os níveis de actividade nas várias áreas de negócio em que a Efacec actua e os indicadores económico-financeiros, evidenciam e revelam um melhor desempenho face ao ano transacto, representando 2007 mais um ano em que, de forma sustentada, a empresa atingiu resultados que demonstram uma boa performance, dos quais se destacam [16]:

- As encomendas registadas no exercício de 2007, ascenderam a cerca de 563 M€, o que representa um aumento de 30% face a 2006. O volume de Encomendas do Mercado Externo foi ainda mais significativo, com um acréscimo de 50% face ao ano transacto.
- As vendas registaram um crescimento de 19% em relação a 2006, atingindo o montante de 440 M€ e registando de igual modo um incremento significativo no mercado externo (+ 42%).
- Os resultados operacionais cresceram neste exercício 19%, passando de 21,4 M€ para 25,4 M€.
- A produtividade, medida em termos de vendas por efectivo, passou de 148,6 para 158,8 milhares de euros por efectivo, correspondente a um aumento de 7% em relação ao ano anterior.

Em Maio de 2007 a Efacec desenvolveu um novo modelo organizacional, desenhado para responder aos desafios da internacionalização futura da empresa.

Nesse sentido, focou a sua actividade em dez Unidades de Negócio, responsáveis pelo desenvolvimento global da actividade respectiva: Transformadores, Aparelhagem de Média Tensão, *Servicing* de Energia, Engenharia, Automação, Manutenção, Ambiente, Renováveis, Transportes e Logística.

Por outro lado, mantendo um inequívoco interesse no mercado nacional, a Efacec desenvolveu em simultâneo uma nova abordagem ao mercado internacional, ao focar a sua actividade em seis regiões consideradas mercados prioritários, onde pretende replicar as suas Unidades de Negócio: Estados Unidos da América; América Latina (Brasil, Argentina e Chile); Europa Central (Roménia, Bulgária, República Checa, Eslováquia e Hungria); Magrebe (Argélia, Marrocos e Tunísia); África Austral (Angola, África do Sul e Moçambique) e Espanha.

Presente com operações, projectos, obras e/ou delegações comerciais em mais de 65 países em todo o mundo, a Efacec considera no entanto, que para além das seis regiões alvo mencionadas, existem condições de mercado para que quatro dos seus dez negócios (Transformadores, Transportes, Automação e Média Tensão), sejam replicados à escala global, sendo por isso desenvolvidos em todo o mundo.

Em 2007 a Efacec avançou de forma considerável quanto à concretização do seu objectivo de crescimento no mercado internacional, através de diversos factos de grande importância estratégica.

Em Junho, foi inaugurada uma nova Unidade Industrial da Bauen Efacec, localizada em Córdoba (Argentina), mercado onde a Efacec espera quintuplicar a facturação dentro de cinco anos. A Bauen é, internacionalmente, um dos mais antigos pólos industriais com ligação à Efacec. O presente investimento é o culminar de uma parceria iniciada em 1996, com a empresa local Bauen, S.A..

No primeiro semestre do ano foram de igual modo decididos dois importantes investimentos nos Estados Unidos, ambos no Estado da Geórgia:

- A construção de uma fábrica de transformadores de potência em Effingham (cerca de 370 km a Sudeste de Atlanta), um investimento que ascenderá a cerca de 80 M€ na sua globalidade. Esta nova unidade produtiva criará, numa primeira fase, 400 postos de trabalho e iniciará a produção na segunda metade de 2009.
- A compra da ACS – Advanced Control Systems, empresa de Engenharia sediada em Atlanta. A ACS conta com cerca de 100 colaboradores com formação em engenharia e desenvolve actividades complementares às da Efacec no campo da Automação e Controlo, detendo uma posição de liderança nestes domínios, no mercado dos USA.

Ainda no que respeita aos projectos internacionais, a Efacec do Brasil concretizou a compra da empresa Energy Service, Ltda., (Brasil – Recife), detendo 2/3 do seu Capital Social. Esta sociedade assumiu no mercado a designação de Efacec Energy Service, Ltda. e conta actualmente com cerca de 65 colaboradores.

Do mesmo modo, no segundo trimestre de 2007, a Efacec concretizou um *Memo of Understanding* com a Controls & Switchgear, empresa indiana, com vista ao desenvolvimento de actividades de média tensão.

No que respeita a grandes negócios envolvendo parcerias, a Efacec integrou, em Setembro de 2007, o Consórcio Ventiveste (Efacec, Galp Energia, Enersis, Martifer e RePower Systems), que ganhou o primeiro lugar da Fase B do concurso público lançado pelo governo português, para a produção de energia eólica (400 MW de capacidade instalada).

No final de 2007 houve a alteração da imagem corporativa da Efacec, com a respectiva alteração do seu logótipo e que viria a ser implementada no início de 2008.

Dado o novo ciclo de vida em que a Efacec se encontra, o poder da marca Efacec nos mercados nacional e internacional é ainda mais forte e constitui-se como factor distintivo e elemento de acrescida competitividade.

Neste contexto, a modernização da imagem da Efacec, através da renovação do seu logótipo, corporizou uma atitude de flexibilidade, de capacidade inovadora e de vanguarda tecnológica, presente e futura.

1.1.3. Marcos Históricos

O Grupo Efacec tem uma longa história cujas raízes remontam ao início do século passado [16].

1905 O projecto Efacec iniciou-se em 1905 com a inauguração de “A moderna, Sociedade de Serração Mecânica de Madeiras.”

1917 Esta pequena unidade, dirigida por Albino Ribeiro Gonçalves, pai dos engenheiros António e Guilherme Ricca Gonçalves, produz, em 1917, os primeiros motores eléctricos fabricados em Portugal.

1921 É fundada a Electro-Moderna, Lda., “Fábrica de Motores e Geradores de c.a. e c.c. de Transformadores e de Acessórios Eléctricos” (EML), empresa onde se geraram as energias e capacidades que mais tarde, no final dos anos 40, constituíram a base essencial de arranque da Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas.

1948 É fundada a sociedade Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas, S.A.R.L., com o capital distribuído entre a Electro-Moderna (20%), os ACEC (20%), a CUF (45%) e outros accionistas (15%).

A sociedade nascente tinha por objectivo o “exercício da indústria, comércio, instalação e reparação de material eléctrico e mecânico e de todas as actividades correlativas”.



Figura 4 – Foto da EFA-ACEC

1957 São dados os primeiros passos na afirmação da capacidade tecnológica e industrial. Inicialmente dedicada à produção de motores eléctricos, a Efacec dá, a partir de 1957, os primeiros passos na produção de transformadores.

1959 Em 1959, a Efacec passa a constituir a maior sociedade portuguesa no campo da electrotecnia.

Inicia a fabricação dos grandes transformadores de potência do tipo Shell, entrando deste modo no mais restrito 'club' dos fabricantes mundiais deste equipamento.

1966 Entre 1966 e 1973, a Efacec vê crescer 2,5 vezes a sua área fabril e 6 vezes o seu volume de encomendas.

1970 As acções da Efacec são admitidas, em 1970, na Bolsa de Valores de Lisboa.

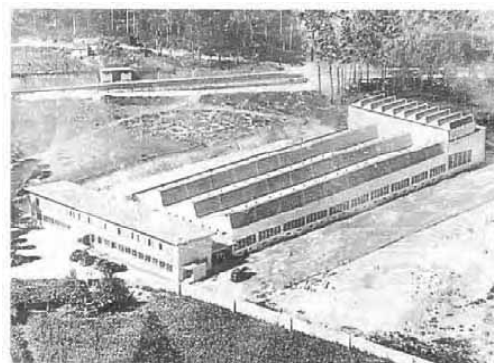


Figura 5 – Aumento das instalações da Efacec

1976 Nos anos de 1976 e 1977, dá-se início à actividade na área dos Sistemas de Tracção.

- 1980** Em 1980 é adquirida a quase totalidade das acções da RABOR, providenciando-se a construção de uma unidade de produção de motores eléctricos à escala europeia.
- 1987** Com a saída em 1987 do sócio maioritário, os ACEC, a Efacec inicia um novo período na história da empresa.
No final da década de oitenta, assiste-se aos primeiros passos da implementação de uma estratégia de internacionalização.
- 1990** Em Junho de 1990 criam-se as primeiras empresas afiliadas detidas a 100% pelo Grupo Efacec.
- 1997** Em 1997 a Efacec entra numa nova fase de internacionalização, da qual uma etapa fundamental é o início de laboração da LIAOYANG Efacec Electrical Equipment, Co. Ltd. Outras *joint-ventures* com empresas locais, noutras zonas do globo, são constituídas.
- 1999** No final de 1999 foram aprovados os princípios orientadores de uma nova estratégia para o Grupo Efacec, a qual visou o reforço e a consolidação da competitividade, através da reorganização em três Pólos (EAS-Engenharia, Ambiente e Serviços; EN-Energia; TLE-Telecomunicações, Logística e Electrónica).
- 2002** O ano de 2002 marca a viragem do Grupo, com o desenvolvimento de uma cultura interna mais focada no "valor sinérgico" das actividades das empresas participadas, na criação de valor e na orientação para o Cliente.
Em termos quantitativos, o Grupo apresenta os maiores índices de rendibilidade de sempre.
- 2003** O ano de 2003 foi o ano da Consolidação da recuperação iniciada em 2002 e da preparação da etapa de Desenvolvimento sustentado que se seguiu.
Iniciou-se o desenvolvimento a prazo dos negócios na Área Internacional, dando continuidade à focagem em mercados e clientes alvo e privilegiando a exportação de sistemas por oposição à tradicional abordagem de exportação de produtos.
Foi criada uma Unidade de Serviços Partilhados.
Foi implementado o projecto de inovação “EFAInova”, considerando a inovação como um processo sistemático, contínuo e sustentado e um imperativo para a contínua criação de valor.
- 2004** A performance da Efacec em 2004 confirmou a etapa de desenvolvimento sustentado, cujo principal objectivo consiste na duplicação da performance e dimensão do Grupo nos próximos cinco anos e, a dez anos, em replicar, noutros continentes, as actividades que hoje desenvolve em Portugal.
Em 2004 a Efacec envolveu um consultor externo no aprofundamento, ratificação e exploração de cenários de desenvolvimento estratégico para o seu portfolio de negócios, face à evolução da envolvente externa e respectiva eficácia/custos com resultados muito encorajadores.
A Efacec aderiu ao Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável, manifestação clara do seu intervencionismo como Grupo social e ambientalmente responsável.
- 2005** A Efacec obteve várias conquistas em 2005, com destaque, a nível corporativo, para o prémio obtido no “Stock Awards 2005”, em que foi eleita a 2ª melhor empresa cotada da Euronext Lisboa, com base numa avaliação feita ao longo dos últimos três anos,

que incidiu sobre: Rentabilidade Total da Acção; Crescimento das Vendas e do Resultado Líquido; Rentabilidade do Activo, das Vendas e do Capital Próprio. Obteve ainda o 2º lugar no “Investor Relations Awards 2005” referente ao Grande Prémio para o Melhor Programa Global de Investidores.

No início de 2005, a Efacec concentrou o seu portfolio de negócios, em três grandes áreas de actividade: Soluções para Energia, Soluções para Transportes e Logística e Soluções de Engenharia e Serviços, sustentando uma abordagem Sistemista/ Integradora, satisfazendo as necessidades actuais do mercado e rentabilizando as várias valências do Grupo.

A Efacec reforçou o seu posicionamento no mercado de Prestação de Serviços de Manutenção, tendo para o efeito adquirido a BRISA Conservação de Infra-Estruturas, S.A., a ATM-Assistência Total em Manutenção e a actividade de Manutenção da Engimais.

Em 7 de Outubro, com vista à aquisição do controlo conjunto da Efacec, Capital, SGPS, S.A., os seus dois principais Accionistas, Grupo José de Mello e Têxtil Manuel Gonçalves, através da Tecnoholding, SGPS, S.A., sociedade participada por ambos, lançaram uma Oferta Pública de Aquisição Geral e Obrigatória sobre o capital social da Efacec.

2006 Em 21 de Fevereiro de 2006 a Efacec retirou de bolsa todas as suas acções, na sequência da concretização, com sucesso, da operação de lançamento de uma Oferta Pública de Aquisição sobre as acções representativas do capital social da Efacec, por parte dos seus Accionistas de referência, Grupo José de Mello e Têxtil Manuel Gonçalves.

Foi construído e inaugurado o novo Laboratório de Ensaios de Transformadores de Potência, obra emblemática para a Efacec, que lhe permitiu criar condições para abordar o mercado dos EUA das grandes unidades de 500.000 volts e entrar no “clube reservado” norte-americano dos maiores fabricantes mundiais de Transformadores. Esta obra foi inaugurada por Suas Excelências o Sr. Ministro das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Eng. Mário Lino e Sr. Secretário de Estado Adjunto das Obras Públicas e das Comunicações, Dr. Paulo Campos.

Em 2006 foram efectuadas diversas reestruturações significativas na Efacec, nomeadamente o processo que deu origem à constituição, já no início de 2007, da Efacec Sistemas de Gestão, S.A.

Foram igualmente efectuadas outras reestruturações com vista a uma focagem da Efacec no seu core business, com os consequentes aumentos de rentabilidade, e de eficiência e a uma orientação cada vez mais profunda às necessidades dos clientes, entre as quais se destacam, a alienação da participação detida na Microprocessador, Sistemas Digitais, S.A., e a fusão da ENT-Empresa Nacional de Telecomunicações, S.A. na Efacec Sistemas de Electrónica, S.A.

A Efacec foi homenageada pela Associação Industrial Portuguesa, com a atribuição da sua Medalha de Ouro, pelo contributo dado pela nossa empresa para a sociedade, para a economia portuguesa e para a imagem de Portugal nos mercados externos.

No final de 2006, o Sr. Dr. Luís Filipe Pereira passou a desempenhar as funções de Presidente da Comissão Executiva da Efacec, em substituição do Sr. Eng. António Cardoso Pinto, que deixou de igual modo de exercer as funções de Presidente do Conselho de Administração, cargo em cujo exercício foi substituído pelo Sr. Eng. Francisco Sánchez que transitou assim da vice-presidência não executiva, que já ocupava na Efacec, para a presidência do conselho de administração.

2007 Alteração, na transição do ano 2006 para 2007, da composição do Conselho de Administração.

Criação da Efacec Sistemas de Gestão, S.A..

Desenho de um novo modelo organizacional, para responder aos desafios da internacionalização futura da empresa, com a criação de dez Unidades de Negócio (Transformadores; Aparelhagem de Média Tensão; *Servicing* de Energia; Engenharia; Automação; Manutenção; Ambiente; Renováveis; Transportes; e Logística) e em seis regiões internacionais prioritárias (USA, América Latina, Europa Central, Magrebe, África Austral e Espanha).

Construção de uma fábrica de transformadores de potência em Effingham (USA-Geórgia), um investimento que ascenderá a cerca de 80 milhões de euros na sua globalidade.

Compra da ACS – Advanced Control Systems, empresa de Engenharia sediada em Atlanta (Geórgia), que desenvolverá actividades complementares às da Efacec no campo da Automação e Controlo.

Inauguração da nova unidade industrial da Bauen Efacec, localizada em Córdoba (Argentina).

Compra pela Efacec do Brasil, da empresa Energy Service, Ltda., (Brasil – Recife).

Concretização de um MOU com a Controls & Switchgear, empresa indiana, com vista ao desenvolvimento de actividades de média tensão.

Integração no Consócio Ventiveste que ganhou o primeiro lugar da Fase B do concurso público lançado pelo governo português para a produção de energia eólica (400 MW de capacidade instalada).

Certificação em IDI, obtida pela Efacec Sistemas de Electrónica, uma das quinze empresas portuguesas, a obter a certificação, num projecto coordenado pela COTEC e desenvolvido pela primeira vez em Portugal.

Obtenção de dois importantes reconhecimentos externos no âmbito da Responsabilidade Corporativa: conquistar o primeiro lugar (ex-aequo com a EDP) no prémio “Empresa mais Familiarmente Responsável”; uma Menção Honrosa na vertente do desenvolvimento económico, no prémio “Cidadania das Empresa e das Organizações”.

1.1.4. Efacec Energia

O Grupo Efacec é líder no fornecimento de soluções integradas e de bens de equipamento para o mercado de produção, transmissão e distribuição de energia.

Esta agregação de competências que constituem uma cadeia de valor integrada, abarca o projecto, a produção de equipamentos e a concepção de soluções integradas, desenhadas à medida das necessidades dos clientes. Contempla ainda a prestação de serviços de assistência e manutenção.



Figura 6 – Transformador de Potência

A oferta de Grupo Efacec cobre: a Produção de Energia, os Sistemas de Transmissão e Distribuição, os Sistemas de Automação e Telecontrolo, os Sistemas de Alimentação e os Serviços de Assistência e Manutenção.

Equipamentos de Energia:

- Transformadores de Potência até 525 kV e 600 MVA¹;
- Aparelhagem de Alta Tensão até 420 kV;
- Subestações Móveis até 245 kV e 80 MVA;
- Transformadores de Distribuição;
- Equipamento de Média Tensão até 36 kV;
- *Servicing*.



Figura 7 – Transformadores de Distribuição



Figura 8 – Subestação Móvel



Figura 9 – Equipamento de Média Tensão

1.1.5. Concorrentes no mercado internacional dos transformadores de potência

A aposta da Efacec no mercado Internacional, bem como um forte investimento na Inovação e no desenvolvimento de novas tecnologia, em articulação com as tecnologias de base, fazem com que a Efacec tenha sabido impor-se no mercado, posicionando-a na linha da frente da indústria portuguesa e nos mercados internacionais.

A quota de mercado estimativa, apresentada na Tabela 1, foi amplamente confirmada por uma investigação de mercado.

Tabela 1 - Principais fabricantes mundiais de Transformadores de Potência [3]

Produto	Siemens	VA Tech	Combinados	Principais concorrentes
Transformadores de Potência	[10 – 20]	[10 – 20]	[20 – 30]	ABB [20 – 25], Areva [15 – 20], RWE Solutions [7 – 14], Pauwels [2 – 5], Efacec [2 – 5], outros

A investigação do mercado confirmou que há basicamente quatro concorrentes (Siemens, VA Tech, ABB e Areva) que são os principais fabricantes de transformadores de potência. Outros fabricantes, incluindo Efacec, RWE Solutions, Pauwels abrangem ainda uma pequena parcela no mercado internacional.

1.2. Transformadores de potência

A *ANSI/IEEE* define transformador como um dispositivo eléctrico, envolvendo partes móveis não contínuas, utilizado em sistemas de energia eléctrica de modo a transferir energia entre circuitos através do uso da indução electromagnética [4]. O termo transformador de potência é utilizado para se referir a transformadores usados entre o gerador e os circuitos de distribuição, sendo geralmente classificados para valores de 500 kVA e superiores.

Os transformadores de potência são seleccionados com base no pedido, com a ênfase dada ao design personalizado, mais evidente quanto maior a unidade, estando disponíveis com uma única fase ou com 3 fases.

A construção de um transformador depende da aplicação. Transformadores destinados ao interior são principalmente do tipo seco mas também podem ser imerso líquido. Para utilização no exterior, os transformadores são usualmente imersos com líquido [4].

1.2.1. Constituição de um transformador

- Parte Activa

Um transformador compõe-se de 2 elementos activos [17]:

- O núcleo magnético (condutor magnético) constituído por um empilhamento de chapas de qualidade especial, isoladas entre elas;
- Os enrolamentos (no mínimo 2, por vezes mais) condutores da corrente, bobinados em volta do núcleo.

Têm respectivamente n_1 e n_2 espiras, sendo:

- Enrolamento Primário: o que absorve a energia eléctrica da rede;
- Enrolamento Secundário: o que fornece a energia eléctrica à rede.

Alguns transformadores podem comportar mais enrolamentos secundários (chamados transformadores de 3 ou mesmo 4 enrolamentos).

Os enrolamentos são normalmente classificados segundo a tensão da rede [17]:

- Enrolamento de “Alta Tensão (AT)”: ligado à rede cuja tensão é mais elevada;
- Enrolamento de “Baixa Tensão (BT)”: ligado à rede cuja tensão é mais baixa.

Do ponto de vista construtivo, podemos considerar dois tipos de transformadores:

- Transformador tipo concêntrico, ou Core (Figura 10 a);
- Transformador couraçado com enrolamentos imbricados, Shell (Figura 10 b).

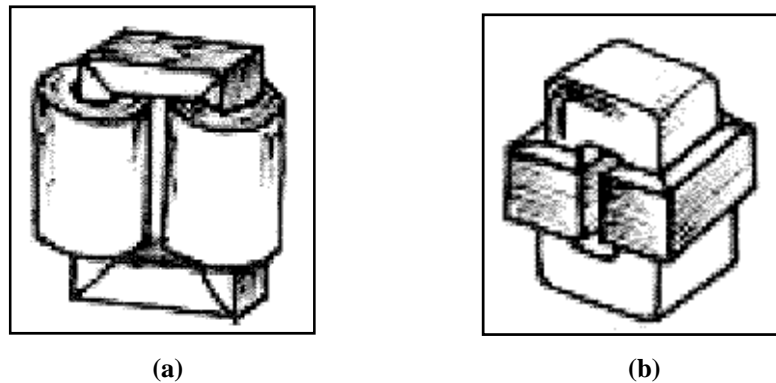


Figura 10 – Tipos construtivos [17]

No tipo Core o eixo dos enrolamentos, concêntricos, é vertical.

No tipo Shell os enrolamentos são constituídos por bobinas verticais (galetes²) justapostas, formando um conjunto cujo eixo é horizontal.

As chapas do circuito magnético, colocadas horizontalmente, fecham-se em torno do enrolamento central. Este último parece encaixado dentro do circuito magnético com uma ostra dentro da coquilha, de onde lhe vem o nome, originário dos Estados Unidos, “Shell Type”.

1.2.2. Elementos acessórios

- Cuba com óleo (para assegurar o isolamento e a evacuação das perdas);
- Travessias;
- Comutadores de tomadas (Reguladores);
- Circuitos de arrefecimento;
- Aparelhagem de controlo e protecção.

1.2.3. Princípio de funcionamento

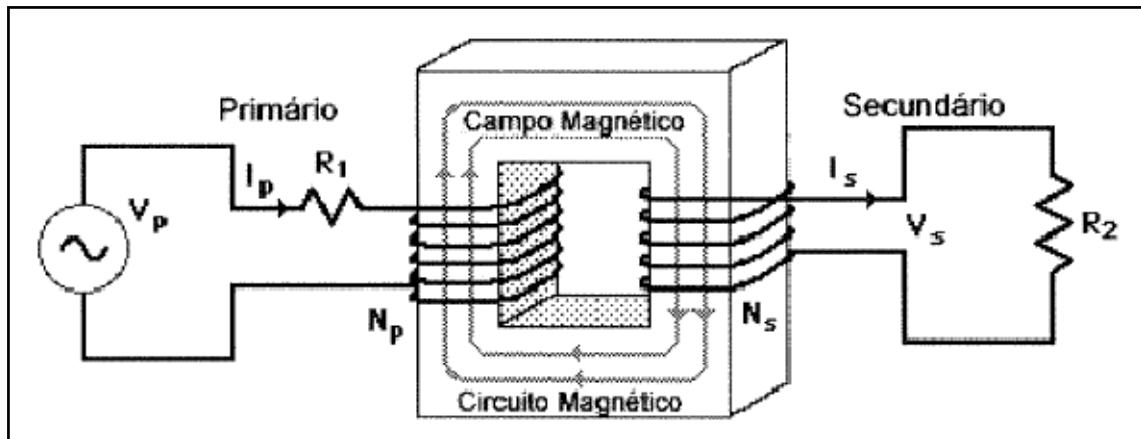


Figura 11 – Esquema básico de um transformador

O primário recebe a energia da rede, segundo uma tensão V_p (alternada).

O secundário fornece a energia ao receptor sob uma tensão V_s .

A transferência de energia entre enrolamentos é feita por interacção electromagnética:

- A corrente primária I_p gera um fluxo magnético no circuito magnético;
- O fluxo por sua vez induz uma força electromotriz no enrolamento secundário, gerando a corrente I_s ;

nessa interacção existe fluxo de fugas, que obriga à colocação de *shunts* magnéticos.

Num transformador ideal, isto é, sem perdas de energia, teríamos:

Energia fornecida = Energia recebida (rendimento 100%)

Como nenhuma energia é utilizada pelo próprio aparelho, e na realidade a energia fornecida é inferior em pequena percentagem à recebida, a diferença corresponde a uma pequena potência de perdas que se manifesta em calor e que deve ser evacuada através de circuito de arrefecimento [17].

O transformador não faz mais que variar os factores que compõem a energia, ou potência por ele absorvida, ou seja, a tensão e a corrente que alimenta o primário.

O primário absorve uma corrente I_1 , à tensão U_1 , enquanto que o secundário fornecerá uma corrente I_2 , a uma tensão U_2 .

$$V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

Ao valor $\frac{V_p}{V_s} \cong \frac{n_p}{n_s}$ chama-se *relação de transformação*, onde:

n_p é o número de espiras do enrolamento primário;

n_s é o número de espiras do enrolamento secundário.

Podemos dizer que à transformação da tensão corresponde uma transformação inversamente proporcional da corrente, mantendo-se constante o produto dos dois factores transformados.

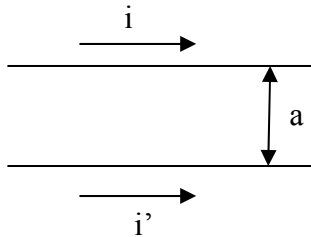
1.2.4. Esforços de Curto-Circuito

1.2.4.1. Condutores paralelos

Se 2 condutores paralelos de comprimento infinito são percorridos por uma corrente eléctrica, exerce-se entre eles uma força de atracção ou repulsão, (correntes do mesmo sentido – atracção; sentidos opostos – repulsão) directamente proporcional ao produto da intensidade da corrente que os percorre [17].

Na figura seguinte temos que a força de atracção, por metro, entre os dois condutores é dada pela fórmula:

$$F = 2 * 10^{-7} * \frac{i * i'}{a} (N / m)$$



a – distância entre condutores, em metros

i, i' – correntes que os percorrem, em Ampere

F – força entre os condutores, em Newton

Da fórmula acima podemos definir Ampere como sendo a corrente que percorrendo dois condutores paralelos afastados de 1m os atrai ou afasta com uma força de $2 * 10^{-7}$ N por metro.

Exemplo:

Para o caso de 2 condutores afastados 5cm, normalmente percorridos por uma corrente de 2000A, teremos:

$$F = 2 * 10^{-7} * \frac{2000^2}{0,05} = 16 N / m (0,00163 kg / cm)$$

Com uma corrente de curto-circuito de 50kA teremos:

$$F = 2 * 10^{-7} * \frac{50000^2}{0,05} = 10^4 N / m (10,2 kg / cm)$$

que seria o valor a considerar para o cálculo da sua fixação, considerando só o esforço de curto-circuito.

1.2.4.2. Transformadores tipo Core

Neste tipo de transformadores, onde os vários enrolamentos são concêntricos, existem esforços axiais entre galletes (FA) e esforços radiais (FR) entre os vários enrolamentos [17].

O sentido das forças axiais é o sentido de atracção dos vários enrolamentos (condutores percorridos por correntes do mesmo sentido atraem-se).

O sentido das forças radiais é o sentido da repulsão entre enrolamentos (Figura 12).

O valor da força (F) e das suas componentes é directamente proporcional ao quadrado dos amperes-espira dos enrolamentos em presença.

$$F = K * (NI)^2 (daN/cm)$$

Sendo:

K um factor dependente do sistema de unidades e da geometria do enrolamento;

F o esforço sobre a cuba.

A título de exemplo, indica-se o valor das forças para um transformador de 50MVA 132/33kV:

AT: FA = 50ton (força de estabilização = 43ton);

BT: FA = 100ton (força de estabilização = 28ton).

A força radial é de cerca de 1500ton, distribuídas pelo perímetro do enrolamento.

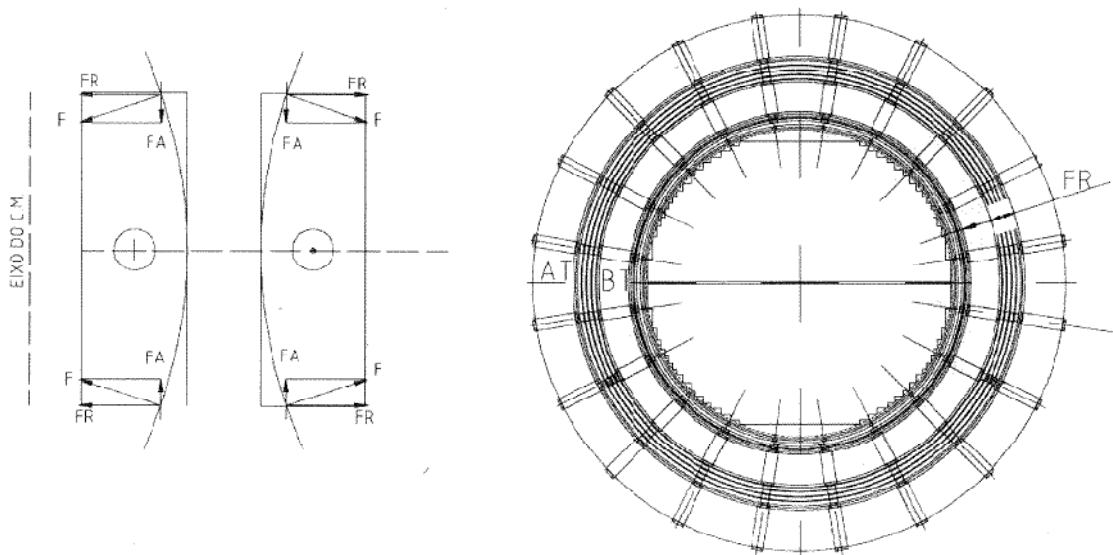


Figura 12 – Esforços de Curto Circuito [17]

Efeito da componente radial

Observando a Figura 12 podemos constatar que a componente radial é suportada pelo próprio enrolamento, tendo um efeito de esticar a bobina exterior e comprimir a interior contra o núcleo do Circuito Magnético (CM).

Torna-se necessária uma perfeita centragem dos vários enrolamentos, mantendo os tubos intermédios e as respectivas réguas bem ajustadas, assim como uma boa calagem do enrolamento interior relativamente ao CM [17].

Efeito da componente axial

É indispensável que os vários enrolamentos estejam centrados na janela do CM, ou seja, que o eixo eléctrico seja o mesmo.

Se tal não acontecer, teremos uma componente (FA1, Figura 13) que tende a empurrar assimetricamente os enrolamentos contra a culassa, podendo provocar danos.

Garantida a centragem dos enrolamentos (e como consequência $FA1 = 0$) há que tomar todas as medidas no sentido de evitar que a força axial FA possa provocar danos em caso de curto-circuito.

Este objectivo será conseguido desde que não haja qualquer deslocamento relativo das várias bobinas, produzido pela força FA. Ou seja, as várias bobinas (galetes) e a sua estrutura isolante devem estar de tal modo apertadas que a força axial provocada por uma corrente de curto-circuito não provoque qualquer movimento relativo. A essa força de aperto capaz de garantir que não haja deslocamentos relativos das várias bobinas aquando de um curto-circuito chama-se força de estabilização.

Esta força de estabilização é aplicada durante a secagem, e antes da montagem da parte activa.

O êxito das medidas descritas depende dos cuidados a observar durante as várias fases do fabrico:

- Alinhamento de todos os calços;
- Alinhamento radial e ajuste das réguas de centragem;
- Calagem do enrolamento interior face ao núcleo do Circuito Magnético;
- Cumprimento dos procedimentos das instruções operacionais:
 - Formação e calibragem das fases;
 - Estabilização e calibragem dos enrolamentos.

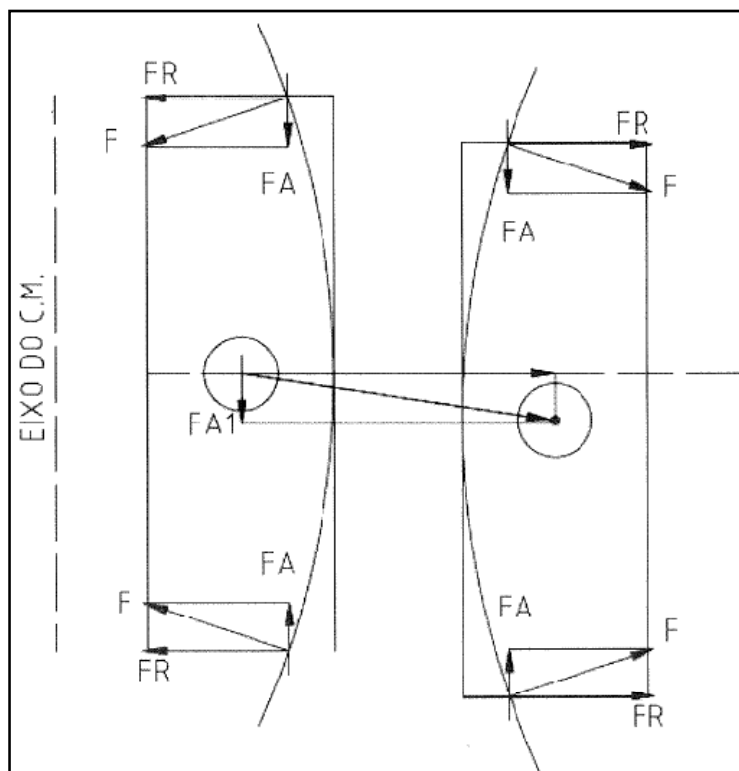


Figura 13 – Esforços de Curto Circuito [17]

1.2.5. Estrutura Isolante

Para além de reduzir ou amplificar a tensão, o transformador deve suportar as solicitações da rede onde se insere e o nível de tensões que ele próprio amplifica. Ou seja, o transformador deve ser construído para satisfazer o nível de isolamento exigido pelo circuito eléctrico de acordo com as normas, normalmente CEI.

Para responder a esta exigência, um dos elementos activos referidos, os enrolamentos, incluem a parte mais complexa e sensível do transformador, a sua estrutura isolante, que é estudada e projectada para responder a 3 exigências fundamentais [17]:

- Suportar as bobinas dos vários enrolamentos garantindo o afastamento entre as galetes;
- Garantir o arrefecimento, criando circuitos de circulação do fluido, normalmente óleo mineral, que melhore o transporte da energia de perdas para o exterior;
- Garantir os níveis de isolamento impostos.

1.2.5.1. Identificação dos componentes isolantes nos Transformadores Core

- Anéis de calagem inferior e superior: estas peças, normalmente em madeira estratificada (*transformerwood*), são o suporte da fase (anel inferior), e a placa que distribui o esforço de compressão aplicado pelos parafusos de pressão no topo (anel superior);
- Calagens gerais: rodela⁵ com calços, comuns aos vários enrolamentos da fase;
- Calagens parciais: rodela com calços, cuja função é manter as distancias de extremidade de cada enrolamento;
- Tubos: podemos distinguir, em função da sua utilização, os tubos cuja função é exclusivamente isolante (tubos entre enrolamentos) e os que têm uma função mecânica (tubos sobre os quais são bobinados os enrolamentos);
- Chapéus e collerettes: são peças especiais cuja geometria é projectada em função do traçado de campo eléctrico, tendo por objectivo a limitação dos valores da intensidade do campo a valores pré-estabelecidos;
- Anéis de guarda: são componentes cuja função é, não só atenuar os efeitos da aplicação de uma onda de choque, como permitir uma melhor uniformização do campo eléctrico. São estruturas electrostáticas complexas que devem ser cuidadosamente executadas;
- Calços e réguas: são componentes cuja função é manter a posição relativa dos vários elementos, garantindo as exigências isolantes;

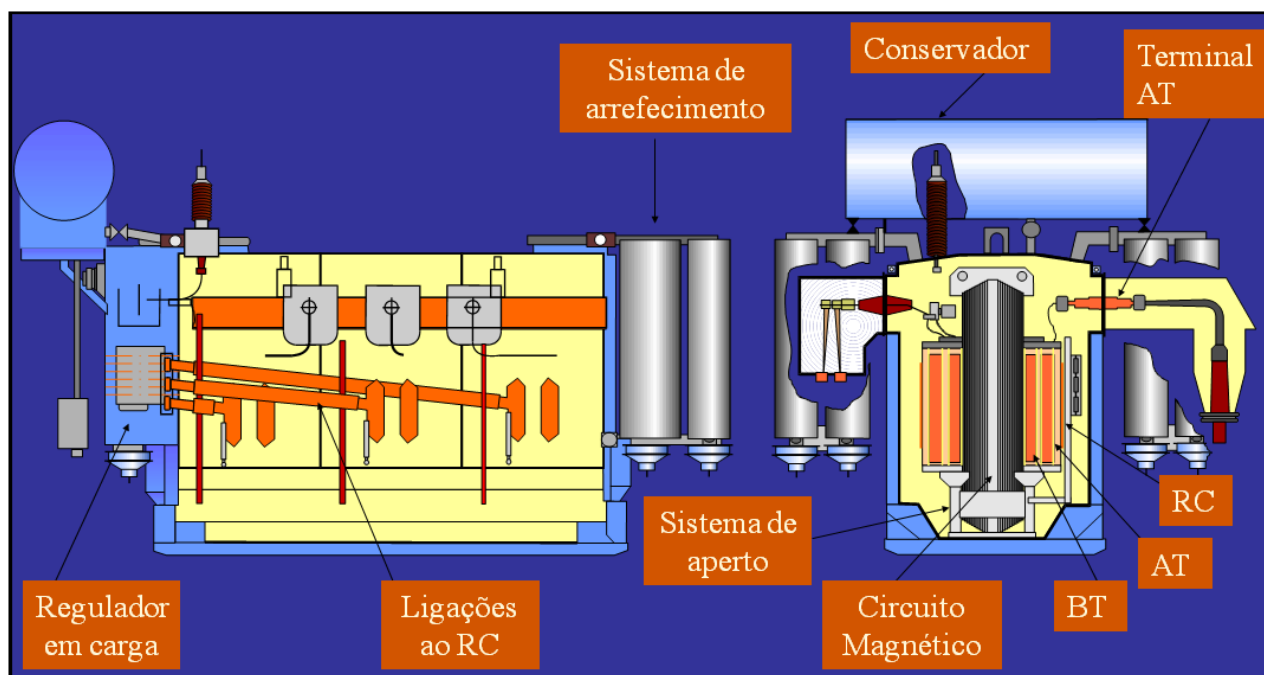


Figura 14 – Constituintes de um Transformador Core

1.2.6. Medidas para o êxito de uma estrutura isolante

O êxito de qualquer operação depende da forma empenhada e consciente como todas as equipas intervenientes contribuem para o produto final.

Concretizando para o caso da construção dos enrolamentos de transformadores, quer se trate de transformadores Core ou Shell e observando os cortes da bobinagem e os respectivos traçados de campo, constatamos quão importante é o cumprimento por parte de todas as equipas dos planos e das respectivas instruções operacionais.

O êxito numa estrutura isolante depende de [17]:

- Execução cuidadosa dos vários componentes;
- Respeito pelas tolerâncias impostas;
- Montagem de todos os componentes respeitando a geometria prevista pelo projecto;
- Rigor no cumprimento das medidas contra a inclusão de matérias estranhas;
- Ter sempre presente que:

$$\text{CUIDADOS} + \text{LIMPEZA} = \text{ÊXITO}$$

1.2.7. Circuito magnético

A habilidade de certos materiais, nomeadamente o ferro, o níquel, cobalto e algumas ligas e compostos, de adquirir momentos magnéticos altos e permanentes é de grande importância para a engenharia electrotécnica.

A importância histórica e comercial do ferro como um material magnético deu origem ao termo *ferromagnetismo* [17]. O ferromagnetismo é o resultado da estrutura electrónica dos átomos dos materiais.

Os materiais magnéticos permitem realização de circuitos magnéticos de baixa relutância, nos quais se pode estabelecer um fluxo apreciável à custa de uma corrente

magnetizante baixa. É através do circuito magnético (e do respectivo campo) que se interligam os vários enrolamentos do transformador, isolados electricamente.

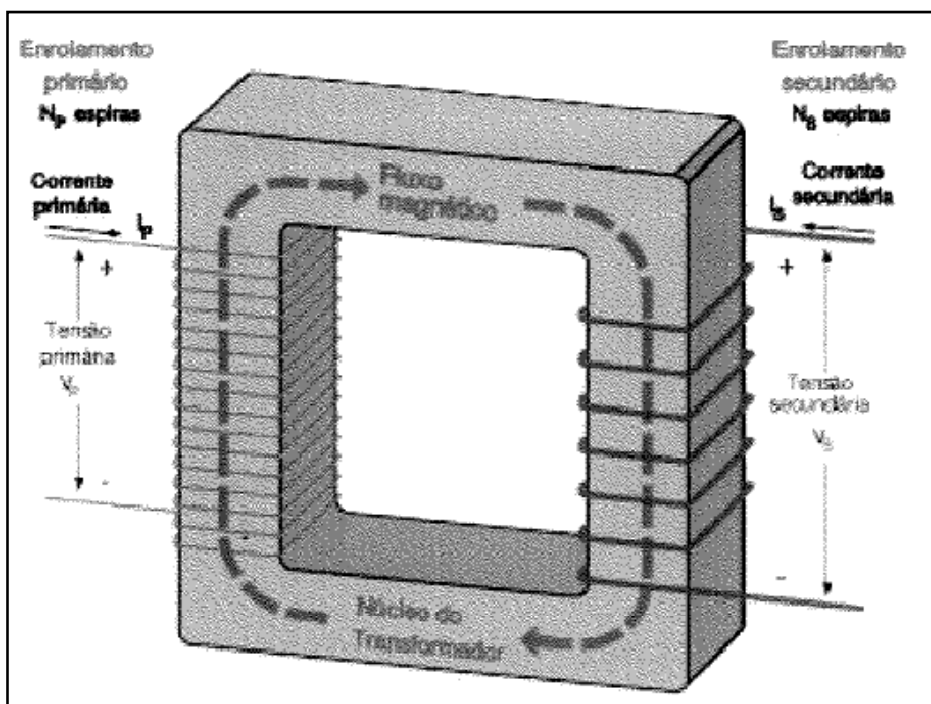


Figura 15 - Esquema básico de um transformador

O circuito magnético é atravessado por uma corrente alternada (variável) I_p . É então gerado um campo magnético, que pode ser ou não variável, dependendo da forma como varia a corrente no circuito primário. Para que o transformador funcione, ele tem que ser variável.

O circuito secundário é atravessado pelo campo magnético variável gerado pelo circuito primário. É então produzida no circuito secundário uma corrente I_s , que tem a mesma forma de onda da corrente que atravessa o circuito primário, mas com a tensão alterada, para mais ou menos, de acordo com um factor de proporcionalidade: a relação no número de espiras dos circuitos (N_s/N_p).

A tensão no circuito secundário V_s (tensão de saída) é igual a tensão no circuito primário V_p (tensão de entrada) multiplicada pela razão N_s/N_p sendo N_s o número de espiras do circuito secundário e N_p o número de espiras do circuito primário:

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p$$

Os circuitos magnéticos são construídos empilhando chapas muito finas (0,3mm de espessura), isoladas electricamente umas das outras, para evitar correntes parasitas.

1.2.7.1. Juntas dos núcleos

Nas juntas de mudança de direcção o corte da chapa é efectuado a 45°, para que a circulação do fluxo magnético se faça sempre segundo a direcção de laminagem. A simples junção “topo a topo” dá lugar ao aparecimento de “entreferos” que irão provocar aumento do fluxo de dispersão, da relutância circuito magnético e em consequência do aumento das perdas [17].

Para minimizar este efeito as chapas são colocadas com as juntas desfasadas de modo a haver sobreposição das chapas. Assim, o fluxo segue o caminho de menor relutância passando, na zona do entreferro, para a chapa vizinha. Obtém-se assim uma redução da corrente magnetizante e das perdas.

1.2.8. Óleo Isolante

1.2.8.1. Função do óleo no transformador:

- Isolar
- Refrigerar

1.2.8.2. Aquecimento do transformador em funcionamento

O transformador em funcionamento aquece. Porquê?

Porque é uma máquina e aquece como todas as máquinas: aquece a bomba quando enchemos os pneus, o motor eléctrico quando roda, os moentes e os eixos, da bicicleta com a marcha, a lâmpada eléctrica, aquece as mãos quando com o tempo frio as friccionamos etc.

Toda a máquina aquece em funcionamento. É uma lei geral.

A máquina aquece à custa da energia que lhe fornecemos e, como em geral o aquecimento não é um efeito útil, a energia que nele se transforma é uma perda. Assim as perdas no transformador traduzem-se em aquecimento. Duas arrelias de uma assentada: energia perdida e aquecimento na máquina (arrelias inevitáveis). De máquina para máquina só difere a maneira como a energia se transforma em calor: atrito (fricção), compressão do ar na bomba, efeito de Joule e correntes de Foucault no transformador, etc.

1.2.8.3. O transformador aquece, mas não indefinidamente

O aquecimento pára em certo ponto. A temperatura dos seus elementos (bobinagem, circuito magnético, ligações) não aumenta continuamente, pois a máquina perde calor e, quando o calor perdido em cada ponto for igual ao calor criado nesse ponto então a temperatura estabiliza.

1.2.8.4. Como um corpo perde calor

Quando dizemos que um corpo perde calor significa que o calor sai do corpo, passa aos corpos circundantes, próximos ou afastados, ou ao espaço ambiente.

Nos, por exemplo, aquecemo-nos com o calor perdido pelos tubos do radiador. Pelo princípio do equilíbrio térmico, o calor passa espontaneamente dos corpos mais quentes para os mais frios. Só passa dos corpos a certa temperatura para outros a temperatura inferior ou da parte de um corpo para outra parte do mesmo corpo a temperatura inferior.

As passagens de calor processam-se através [17]:

- **Condução**

Se pegarmos numa barra metálica (cobre, por exemplo) e a aquecermos numa extremidade constatamos que, ao fim de algum tempo a outra extremidade também está quente. O calor propagou-se através do metal. De cada zona à zona vizinha, até todo o corpo ficar à mesma temperatura.

O calor transmitiu-se por condução, porque o cobre é um bom condutor do calor. É de notar que os bons condutores de calor também são bons condutores eléctricos.

- **Radiação**

Todos conhecemos os irradiadores eléctricos de resistência incandescente com um espelho ou reflector por trás. Se nos colocarmos em frente do espelho teremos uma viva sensação de calor que irá reduzindo à medida que rodamos o irradiador. Diremos, neste caso, que o calor chegou até nós por radiação.

Na verdade, o calor propaga-se no espaço exactamente como a luz, e como ela pode ser reflectido. Aproximemo-nos de uma barra de ferro ao rubro: a sensação de calor é forte. A barra irradia calor. A propagação deste tipo verifica-se mesmo no vácuo, quer dizer, mesmo na ausência de ar ou gases.

- **Convecção**

Olhemos para uma panela cheia de água posta sobre o disco do fogão. Lancemos nela algumas partículas sólidas leves. Tornar-se-á evidente a partir de certa temperatura a existência de correntes na massa líquida. Veremos então as partículas sólidas subirem no centro da panela para descer pelas paredes. Dizemos então que no líquido se estabeleceram correntes de convecção, e que o calor nos líquidos se propaga por convecção.

O mesmo se passa em relação aos fluidos. É fácil, nos gases, verificar o mesmo mecanismo: as zonas mais aquecidas dilatam-se tornando-se menos densas e sobem, sendo substituídas por camadas mais frias que por sua vez vão aquecer, repetindo-se o processo indefinidamente. É assim que um radiador aquece uma sala, o ar aquecido por contacto com os elementos radiantes sobe e é substituído por ar frio que por sua vez se aquece. O ar toma calor e o radiador perde calor.

1.2.8.5. Transformador em funcionamento

Observemos um transformador em funcionamento.

Está quente? Então:

- a) Toda a superfície externa irradia calor.
- b) O ar em contacto com as superfícies quentes aquece, eleva-se e é substituído por ar frio.

Estabelecem-se no ar circundante correntes de convecção. Há evacuação ou perda de calor por convecção.

A quantidade de calor perdida por unidade de tempo por um certo corpo quente é:

- Tanto maior quanto mais elevada for a sua temperatura relativamente à temperatura ambiente;
- Tanto maior quanto mais extensa for a superfície transmissora.

Apliquemos os conhecimentos acima ao caso de um transformador seco. Admitamos ainda que impomos certa temperatura máxima aos diversos elementos do transformador. Seremos então obrigados a dar dimensões convenientes, que no caso de transformadores secos terão de ser superfícies de evacuação de calor com, por exemplo, vários e desafogados canais na bobinagem para circulação de ar, grandes superfícies, grandes diâmetros que irão gastar muito cobre. Por outro lado teremos ainda de folgar as secções para que as temperaturas no interior dos enrolamentos não ultrapassem o máximo estabelecido. É também necessário isolar as bobinas e ligações dos dois enrolamentos entres si e da massa.

O ar ambiente como isolante deixa muito a desejar. O seu “poder isolante”⁶ varia com o grau de humidade, a pressão atmosférica e outros factores.

Face ao exposto as dimensões do nosso transformador seco, se se tratar de um transformador de potência apreciável e de tensão média serão já enormes.

Então usamos o óleo. Afogamos o transformador em óleo isolante e, com uma cajadada matamos dois coelhos: activa-se o arrefecimento e reforça-se o isolamento.

a) Activa-se o arrefecimento

O óleo conduz o calor melhor que o ar e tem um calor específico¹⁹ maior. Então as tais correntes de convecção arrastam no mesmo tempo uma maior quantidade de calor que ao ar. A transmissão ao ambiente é muito mais fácil, pois deslocamos o calor para a cuba e radiadores, cuja superfície podemos fazer variar à vontade sem mexer no cobre ou na chapa magnética. Isto torna possível reduzir as dimensões dos canais, o diâmetro das bobinas, as secções, etc.

Além disso o transformador fica protegido dos seus piores inimigos: o oxigénio do ar e a humidade (desde que, evidentemente, se tomem algumas precauções elementares).

b) Reforça-se o isolamento

Como o “poder isolante do óleo” é muito maior que o do ar, podemos agora reduzir fortemente as distâncias entre peças sob tensão. O óleo permite-nos então, em igualdade de segurança, realizar aparelhos muitíssimos mais pequenos, mais leves, mais baratos e de qualidade superior. Pois simultaneamente isola e arrefece.

1.2.8.6. Limitação do aquecimento do transformador

Algumas das razões são evidentes: as temperaturas não podem, por exemplo, atingir aqueles valores que provocariam a fusão do cobre ou do ferro ou a carbonização dos papéis.

Sabe-se que, quando a temperatura se eleva alguns graus, a vida dos isolantes reduz-se a metade. O seu “poder isolante” (rigidez dieléctrica) não baixa mas tornam-se quebradiços, e põem o transformador à mercê do primeiro curto-circuito substancial que aparece.

O transformador envelhece mais rapidamente. Um transformador que aqueça demais, em vez de durar 20 anos, durará 15, 10 ou menos.

Por isso mesmo, uma das razões para o uso dos secadores é esta mesma. É que o tal envelhecimento de que falamos atrás, será tanto mais rápido quanto mais humidade houver no óleo e nos papéis. Por isso se seca o óleo ao encher os transformadores e por isso se colocam os secadores, mesmo quando os conservadores são equipados com membranas separadoras.

1.2.8.7. Presença de humidade e impurezas sólidas no óleo

Não ficam por aqui as possíveis consequências da humidade no óleo. Como resultado final de fenómenos complicados o óleo torna-se ácido, formam-se lamas, e perde algumas das suas propriedades – o óleo envelhece.

Por outro lado, a água diminui o “poder isolante” (rigidez dielétrica) do óleo e dos papéis. Também a presença de impurezas sólidas acarreta as mesmas consequências (diminuição da rigidez dielétrica). Pode até acontecer serem elas as responsáveis por eventuais descargas entre rolamentos ou entre estes e a massa.

Os gases dissolvidos podem provocar os mesmos acidentes. Isto mostra a importância de uma boa filtragem e secagem do óleo do transformador e justifica a vigilância de que deve ser alvo o secador de ar.

1.2.9. Áreas de produção dos Transformadores Core

- Isolantes

Nesta área (Figura 16) é produzido tudo o que está relacionado com o cartão e isolamento do transformador, excepto o que não é possível produzir internamente e se manda vir de outras empresas. Pode-se considerar que, em termos de isolamento, esta área é o alimentador de todo o processo. Mais à frente voltaremos a falar mais pormenorizadamente desta área de produção.



Figura 16 – Área dos isolantes

- Bobinagem

É neste sector que se produzem as bobinas do transformador. Existem seis tipos de bobinas:

- Estabilizações;
- Baixas Tensões;
- Médias Tensões;
- Altas Tensões;
- Regulações;
- Terciários (pouco usuais).

- Calibragem

A calibragem é uma zona de trabalho contígua à bobinagem. A calibragem de uma bobina traduz-se, numa forma simplificada, em dar a altura correcta à bobina por intermédio de macacos pneumáticos (Figura 17) que vão exercer pressão nesta. Seguidamente ela é metida no *Hot Oil Spray*, e quando se retirar do processo deverá ter a altura desejada.

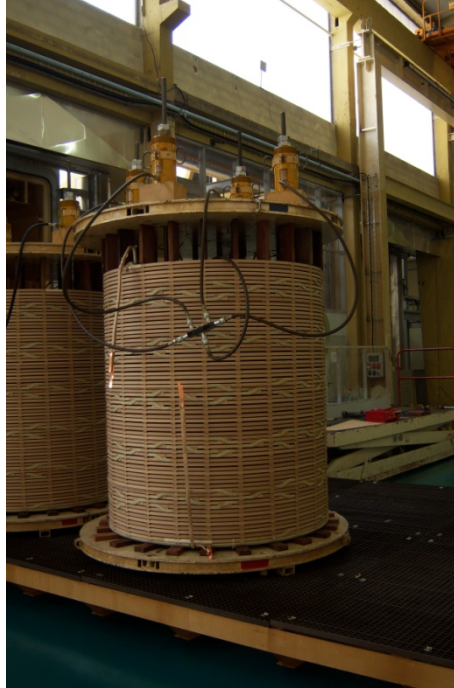


Figura 17 – Bobina com os macacos pneumáticos antes de entrar no *Hot Oil Spray*

- Circuito Magnético

O Circuito Magnético de uma bobina é o núcleo do transformador. Tem forma da letra E deitada (Figura 19), sendo cada posição vertical as fases do transformador – U, V e W – no caso de este ser trifásico. Nos bifásicos o formato é o da letra U. A chapa do CM vem do armazém, já com o formato correcto para a montagem e é recepcionada em folhas que posteriormente são sobrepostas numa base com furos pré-definidos para o projecto em questão de modo a formar as fases correctamente. Após esta operação, o CM montado é colocado na sua posição de utilização pelo berço onde foi aplicado e amarrado (Figura 18). Fica assim pronto a ser transportado para a zona de montagem onde as bobinas do projecto serão aplicadas.

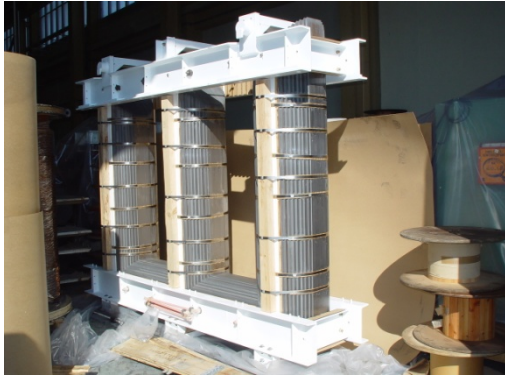


Figura 18 – CM colocado na sua posição de utilização

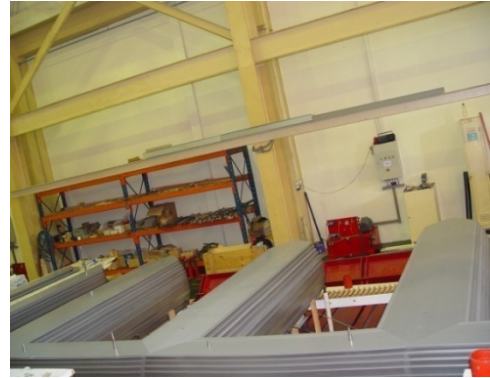


Figura 19 – Núcleo de um transformador trifásico

- Montagem da parte activa e montagem final

A montagem da parte activa é o sector da fábrica onde se faz o acoplamento das bobinas nos circuitos magnéticos, a montagem das tomadas (Figura 20) e onde é introduzido o conjunto dentro da respectiva cuba.



Figura 20 – Montagem da parte activa

- Electrificação e equipamento exterior

Nesta área é realizada a electrificação e montagem do equipamento exterior, tipo manómetros, válvulas assim como é colocado o óleo no transformador.

1.2.10. Diferentes fases até à conclusão de um Transformador Core

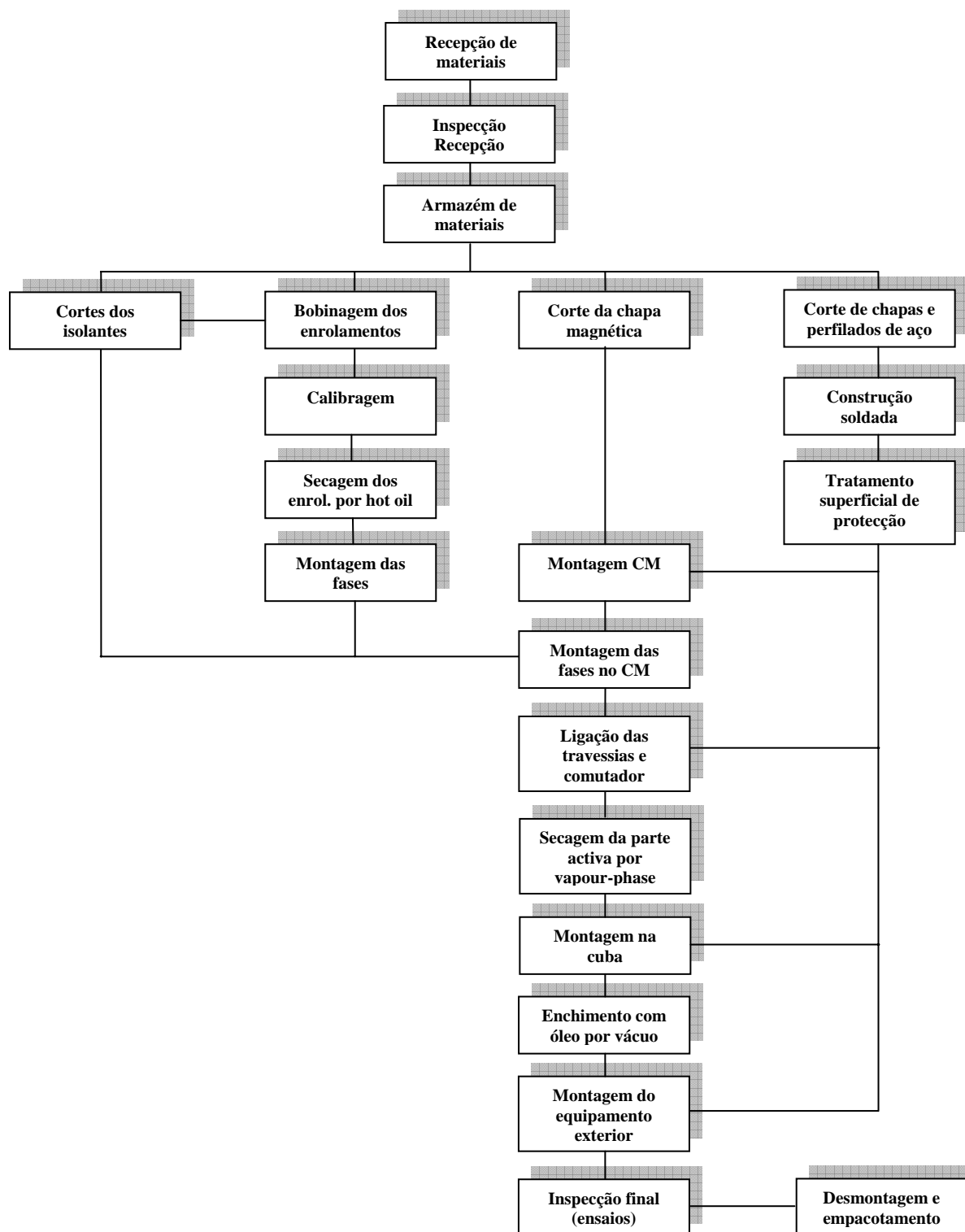


Figura 21 – Diferentes fases até à conclusão de um Transformador Core

1.2.11. Síntese das etapas de produção de um transformador

1. Tudo começa pela necessidade de fornecer mais energia eléctrica às pessoas, ou simplesmente porque alguns transformadores mais antigos vão partindo.
2. Primeiro, é calculado no departamento técnico. Aqui preparam-se teoricamente para fornecer toda energia necessária, suportar os mais agressivos curto-circuitos, descargas atmosféricas e outras surpresas.
3. Em segundo lugar, é desenhado pelo departamento de desenho mecânico, considerando os esforços envolvidos. É neste momento que se enviam ao cliente os primeiros desenhos, em semelhança ao bebé humano com a primeira ecografia.
4. Neste ponto, e após o OK do cliente, começa-se a encomendar aos melhores fornecedores todos os materiais necessários para o desenvolvimento do transformador. Em simultâneo, é preparada toda a produção para a chegada do transformador, planeando meios humanos, máquinas e documentos. Para que nada corra mal, há um departamento só dedicado à análise e observação diária de que nada se atrasa.
5. Finalmente chegam os primeiros materiais ao armazém e, que após cuidadoso controlo de qualidade, serão preparados de forma a poderem ser transformados na produção.
6. Primeiro fazem-se as bobinas do mais puro cobre. Trata-se dos condutores eléctricos onde mais tarde vai circular toda a corrente eléctrica. Este produto constituirá mais tarde aproximadamente 30% do peso final do transformador.
7. Nestas bobinas são incorporados os mais eficazes materiais isolantes para que nunca haja o risco do cobre entrar em curto-circuito. Uma parte leve mas com o preço de um bom automóvel desportivo.
8. Agora só se tem que arranjar um meio para as linhas de força magnética passem da alta tensão para as baixas tensões. Para isto nada é bom de mais. Utilizando chapa especial para este tipo de utilização magnética com uma só espessura de 0,3mm, a produção compõe o núcleo magnético. Esta é mesmo a peça mais poderosa da estrutura de um transformador com aproximadamente 60 toneladas.
9. Agora, num trabalho cuidadoso, colocam as bobinas sobre o núcleo magnético e formam assim a parte activa: o sistema electromagnético onde a energia eléctrica é recebida se transforma em magnética e depois novamente em eléctrica.
10. Como não há aproveitamento de perdas electromagnéticas, 0,3% da potência, este calor tem que sair do interior para não danificar o transformador. É nesta fase que o transformador é colocado num recipiente de aço industrial com um volume de uma boa sala de estar; enchem este óleo mineral que serve para diminuir as distâncias dieléctricas na parte activa e para dissipar o calor para o exterior. Cá fora, esperam múltiplos radiadores, auxiliados por potentes ventiladores, que servem para dissipar o calor para o ambiente, seja com sol ou neve.
11. Para que se detecte a toda a hora o que está acontecer no serviço do dia-a-dia, é colocado um sistema de controlo permanente das funções vitais, pois o mais importante durante a vida do transformador é a fiabilidade em todas as condições de serviço.
12. Finalmente pronto. Seguidamente, para se ter a certeza que está apto para funcionar longos e longos anos, o transformador passa pelo laboratório. É aqui que confirmam todos os valores eléctricos garantidos ao cliente e que aplicam todas as atrocidades que farão parte dos dias mais duros da sua vida: duplicam a tensão aplicada, fazem curto-circuitos, aplicam ondas fortíssimas de descargas atmosféricas com milhões de Volts e muito, muito mais. Claro que tudo controlado e segundo as mais rigorosas normas internacionais.

13. Seguidamente aos testes o transformador é preparado para o transporte, pois depois de pronto é tão pesado e grande que muito dificilmente se poderia transportar sem partir estradas e pontes.
14. Após o controlo final está pronto para a viagem.

2. Processos de Secagem

A presença de humidade no interior do transformador provoca o decréscimo da resistência eléctrica do óleo e do papel e principalmente da resistência mecânica deste. Por exemplo, sempre que o teor de água duplica, a resistência mecânica do papel é reduzida a metade [1]. A presença da água no isolante sólido do transformador reduz também a resistência ao “*tracking*” ou contornamento superficial e provoca um acréscimo na velocidade do envelhecimento do papel, sendo os seus efeitos auto catalíticos, uma vez que, por cada molécula de água que ataca um monómero de glucose na molécula de celulose⁸, se forma uma nova molécula de água, que irá por sua vez atacar um outro monómero e assim sucessivamente [1]. A concentração de água no óleo em quantidades elevadas, superiores à concentração de saturação, pode mesmo originar a formação de bolhas de vapor de água, ou até ao aparecimento de água livre, ou depositada no fundo, ou em suspensão no seio do óleo, o que, com o transformador em serviço, pode conduzir à ocorrência de descargas parciais. A produção destas descargas pode desencadear um processo evolutivo de envelhecimento dos isolantes sólidos (papel e cartão), bem como a produção de gases (principalmente hidrogénio), por decomposição do óleo, que será tanto mais grave quanto maior for a intensidade das descargas parciais. Para além das fontes externas de entrada de humidade no transformador, esta pode ser produzida internamente, por oxidação, tanto do óleo como dos isolantes sólidos. Vários factores influenciam a oxidação do óleo: a composição do próprio óleo, a concentração de oxigénio dissolvido, a temperatura, a presença de catalisadores metálicos, entre outros, podendo diferentes combinações de alguns deste factores promover reacções bastantes diferentes.

Num estado inicial da oxidação do óleo formam-se produtos polares, tais como, álcoois, aldeídos e cetonas, mas à medida que o fenómeno de oxidação avança começam a formar-se ácidos e eventualmente produtos sólidos (lamas).

Todos estes compostos reduzem a resistência à oxidação e consequentemente o tempo de vida útil do óleo. Para além disto, também o tempo de vida útil do papel é significativamente reduzido por acção de concentrações elevadas de ácidos presentes no óleo, que são responsáveis por um decréscimo substancial do grau de polimerização⁹ viscosimétrico médio do papel isolante e consequentemente da sua resistência mecânica. Assim a manutenção de um óleo isolante eléctrico em boas condições de serviço, ao longo do tempo, torna-se imprescindível para a segurança, fiabilidade e durabilidade do equipamento de que faz parte e envolve, sempre que necessário, o tratamento do óleo, de modo a recuperar as suas essenciais propriedades dieléctricas e de fluido arrefecedor.

A concentração média de humidade do papel dos enrolamentos de um transformador pode ser calculada a partir do valor do teor de água determinado no óleo, usando por exemplo as curvas de equilíbrio de Piper (considerando que a temperatura permanece estável existe equilíbrio térmico entre o óleo e o papel) ou outras, tais como as de Fabre – Pichon, as de Oommen, as de Weidmann, ou as de Griffin, entre outras [1].

A maior parte da água presente no interior do transformador encontra-se em cerca de 30% do isolante celulósico (designadamente no papel isolante) [1].

A influência da água na rigidez dieléctrica do óleo depende da condição em que esta se encontra: dissolvida, no estado vapor, em suspensão (ou em emulsão), ou condensada (água ao estado livre).

A secagem de isolamento térmico (celulose) é um fenómeno de difusão, ignorando a evaporação directa da humidade superficial. No caso de um método de secagem de

aquecimento e de depressão, o processo de secagem e a sua qualidade dependem essencialmente dos seguintes factores e critérios:

- Temperatura e distribuição da temperatura no isolante;
- Diferença de pressão parcial do vapor de água (ΔP_{H_2O}) entre as camadas internas do isolante e do ambiente;
- Coeficiente de difusão do isolante;
- Duração do processo de secagem.

Coeficiente de difusão

O coeficiente de difusão está dependente do material a secar. Também é influenciado pela temperatura, pressão e humidade do material [14].

Uma elevação da temperatura de 20°C dobra sensivelmente o coeficiente de difusão [14].

No papel impregnado de óleo, desce para 1/20 a 1/30 do valor correspondente ao mesmo material isento de óleo [14].

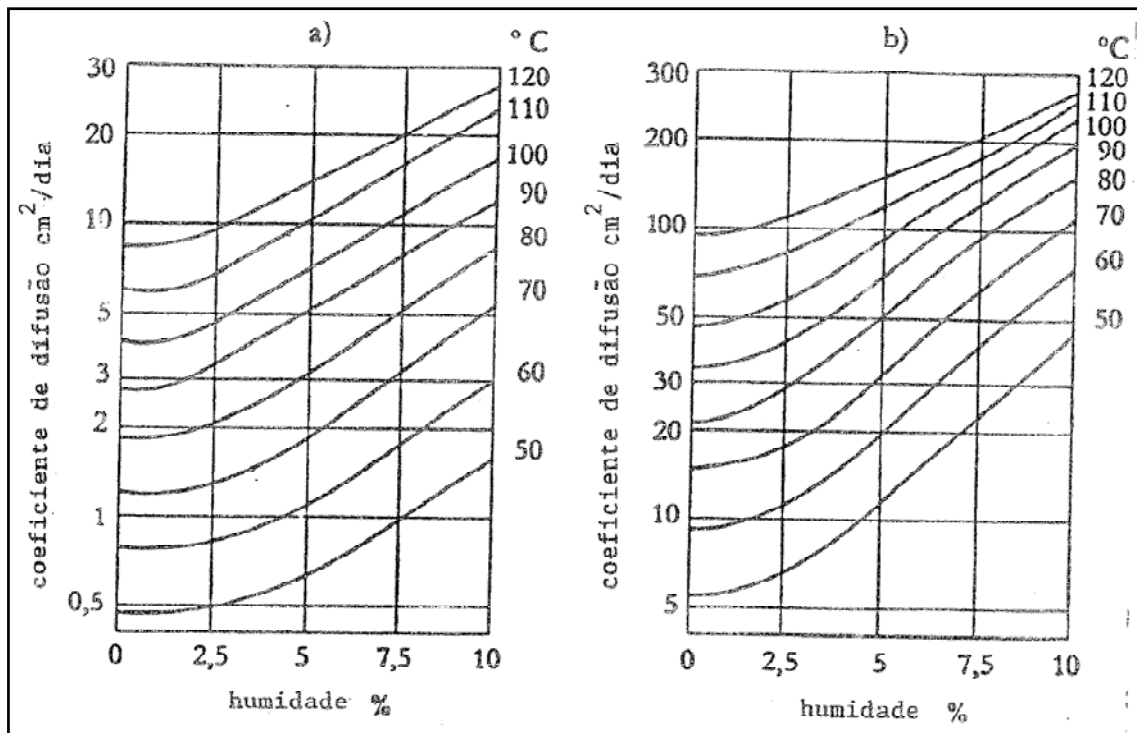


Figura 22 – Coeficiente de difusão do isolante: a) à pressão atmosférica; b) em vácuo 0,1 a 1 torr

2.1. Métodos de Secagem

No caso em que o papel dos enrolamentos se encontra com um teor de água muito elevado, a realização de um tratamento de secagem, exclusivamente ao óleo, não é suficiente para devolver o equipamento às características pretendidas. Terá que ser também efectuado um tratamento de secagem aos enrolamentos do transformador.

A eficiência de secagem de transformadores está dependente, essencialmente, da criação de condições para a difusão e evaporação da água no isolamento sólido. O aumento da temperatura e do gradiente de concentração produzem o aumento da velocidade de evaporação e de difusão, de tal modo que a velocidade de secagem duplica por cada acréscimo de 17°C na temperatura [1]. Por outro lado, para idêntica concentração de humidade, a celulose impregnada de óleo tem um tempo de secagem **5 vezes superior** ao da celulose não impregnada [1]. Para além disto, na prática, o tempo de secagem da massa de celulose, em cada ponto do seu volume global, é proporcional ao quadrado da distância desse ponto à superfície desta. A Tabela 2 ilustra a distribuição da água entre o óleo e o papel do transformador, para diferentes razões da massa de celulose/massa de óleo, assim como a influência da temperatura na partição da água entre estes dois tipos de materiais. Da análise desta tabela pode-se ver que, de facto, a celulose possui uma maior afinidade para a água do que o óleo, funcionando assim como um reservatório da humidade presente no transformador.

Tabela 2 – Influência da temperatura na distribuição da água no óleo e papel do transformador [1]

Temperatura (°C)	Valores de Equilíbrio		Razão da massa de água na celulose e no óleo		
	Água na celulose ^(a) (%)	Água no óleo ^(a) (mg _{H₂O} /kg _{óleo})	1:3 ^(b)	1:8 ^(b)	1:20 ^(b)
25	1	1	3333:1	1250:1	500:1
90	1	27	123:1	46:1	15:1

(a) Valores de equilíbrio para a água na celulose e no óleo.

(b) Razão massa de celulose / massa de óleo.

A quantidade de água nos materiais celulósicos é portanto superior à que se encontra no óleo, em pelo menos uma ordem de grandeza, podendo frequentemente atingir 2 ou mesmo 3 ordens de grandeza.

Por exemplo, T.V. Oommen refere que [1]:

- a 20°C o papel retém 3000 vezes mais água que o óleo;
- a 40°C o papel retém 1000 vezes mais água que o óleo;
- a 60°C o papel retém 400 vezes mais água que o óleo.

Donde se conclui que, à medida que a temperatura sobe a afinidade para água diminui para o isolante sólido (papel) e aumenta para o óleo, ou seja, o equilíbrio estabelecido entre a concentração da água presente no óleo e no papel, desloca-se do papel para o óleo, com a subida de temperatura, uma vez que a solubilidade da água no óleo aumenta com a subida da temperatura. Como já se referiu, existem diversas curvas de equilíbrio, que permitem relacionar a concentração de água no óleo com a concentração de água no papel, para diversas temperaturas, sendo as de Fabre-Pichon (Figura 23), adaptadas e melhoradas posteriormente por Oommen, uma das mais utilizadas na prática para fazer a estimativa da concentração de humidade presente no papel, a partir da concentração de água presente no óleo, em que tal papel se encontra mergulhado [1].

Deve-se no entanto ter cuidado com a interpretação destas estimativas, devido à elevada possibilidade de não existirem condições de equilíbrio, no instante das medições. É ainda preciso ter cuidado na utilização destas curvas de equilíbrio da humidade entre o óleo e o papel, porque elas variam com a técnica de medida utilizada, a proveniência dos dados e os métodos de cálculo utilizados. De referir ainda que, para a mesma temperatura, existe alguma diferença nas características de solubilidade da água nos óleos parafínicos e nafténicos, sendo maior nestes últimos [1].

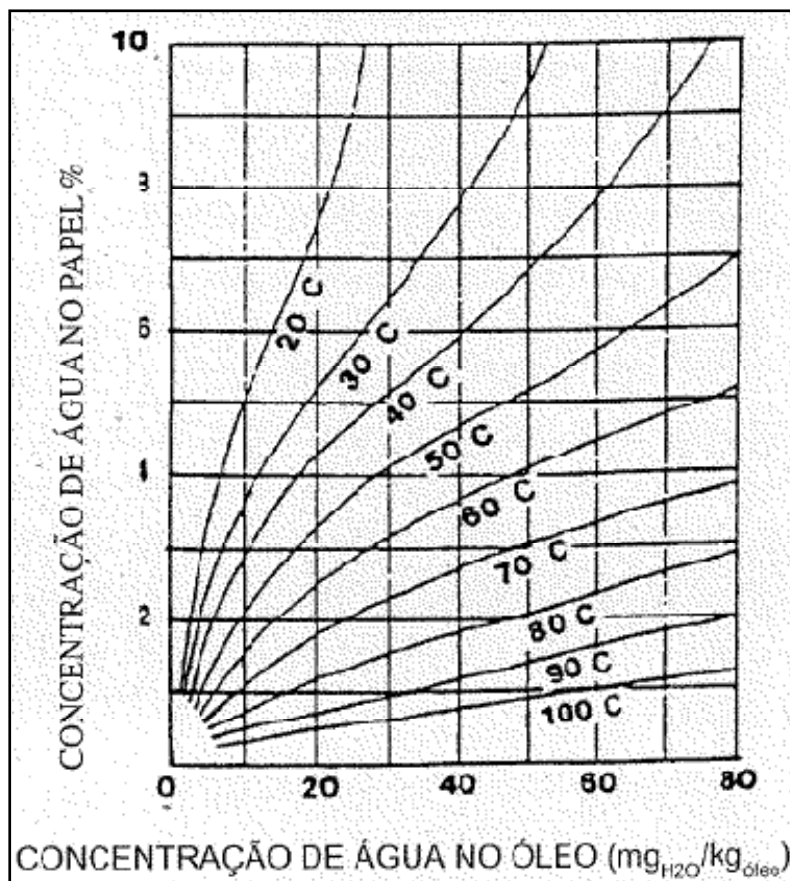


Figura 23 – Curvas de Fabre-Pichon para a distribuição de humidade no complexo óleo/papel Kraft⁴ a diferentes temperaturas [1]

Tabela 3 – Comparação da humidade no sistema papel/óleo, calculada por diferentes autores

Concentração de água no óleo ^(a) (Temperatura)	Concentração de água no papel		
	Oommen	Fabre-Pichon	Griffin
10 mg/kg (70°C)	1,0 %	1,1 %	1,0 %
10 mg/kg (30°C)	3,1 %	3,4 %	4,0 %
60 mg/kg (60°C)	2,9 %	4,5 %	5,0 %
80 mg/kg (70°C)	2,7 %	3,8 %	3,8 %

2.1.1. Sistema de isolamento “Óleo – Papel”

O sistema de isolamento de um transformador é formado por um líquido e um isolante sólido. O líquido será o óleo isolante e o isolante sólido, o papel *kraft*.

O papel *kraft* é usado em transformadores para dar rigidez mecânica e eléctrica. Impregnado com óleo isolante, limpo e seco, é um dos melhores sistemas de isolamento conhecidos pelos fabricantes de transformadores. A celulose (Figura 24), que é a principal constituinte do papel, apresenta-se sob a forma de longas cadeias que são a repetição de um número mais ou menos grande de anéis de glucose (da ordem de 1200/1300) – “C₆H₈O₅”. O grau de polimerização molecular é o número médio de anéis de glucose da molécula de celulose.

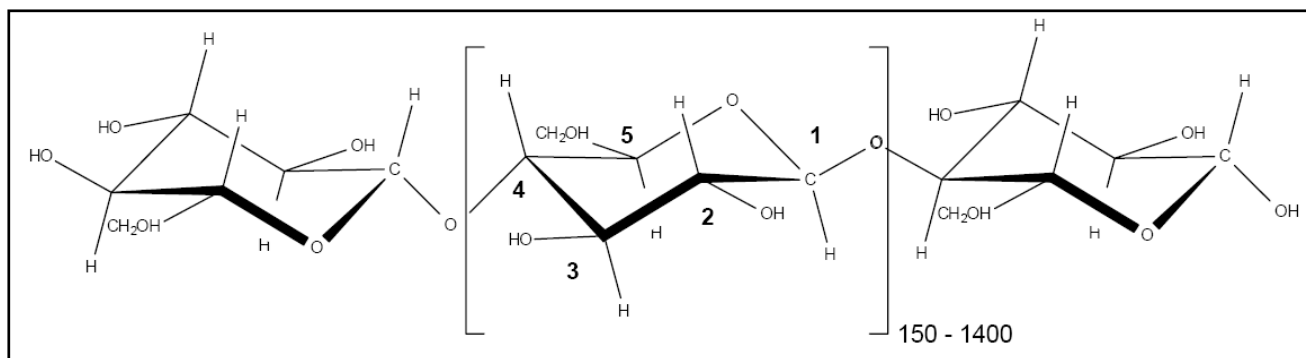


Figura 24 – Representação esquemática da estrutura da celulose

Com a degradação da celulose, o seu grau de polimerização decresce continuamente – desde 1200/1300 até aproximadamente 100. Com valores do grau de polimerização inferiores a 150 o papel praticamente perde a sua resistência mecânica.

O óleo mineral isolante ou simplesmente óleo isolante é obtido a partir do petróleo bruto através de destilação fraccionada e tratamento físico-químico para acabamento final. Este é, portanto, uma associação de hidrocarbonetos, formado de átomos de carbono e hidrogénio, a menos das impurezas e contaminantes.

Os tipos de hidrocarbonetos que constituem o óleo isolante são principalmente, os saturados (alcanos) tipo parafínicos e nafténicos que são quimicamente poucos activos. Isto é necessário para que o óleo não ataque os demais materiais dos equipamentos electromecânicos que entram em contacto com o mesmo. Como os hidrocarbonetos saturados apresentam pouca resistência à degradação em presença de oxigénio e calor, uma parcela de hidrocarbonetos não saturados, da família dos aromáticos, é também constituinte do óleo isolante conferindo-lhe maior estabilidade, ou seja, maior vida útil e melhor desempenho nos equipamentos.

O óleo do transformador é um elemento renovável. Pelo processo de regeneração poderá ser restaurado à condição de novo. O mesmo não ocorre com o papel *kraft* do transformador, o qual não é renovável, e a vida perdida, como resultado da negligência para com esta parte do sistema de isolamento, está perdida para sempre. Portanto, pode-se dizer sem sombra de dúvida que a vida do papel afectará a vida do transformador.

2.1.1.1. Agentes de degradação do papel

Os principais agentes de degradação do papel são: a temperatura, o oxigénio e a humidade.

Temperatura: Em razão da sua fraca estabilidade térmica o papel é objecto de um envelhecimento substancial quando o mesmo é submetido ao efeito da temperatura. Isto traduz-se por uma diminuição das suas características, principalmente as mecânicas. O gráfico da Figura 25, mostra as variações relativas do grau de polimerização em função do tempo de envelhecimento, para cinco valores diferentes de temperatura.

Oxigénio: É outro factor de decomposição do papel impregnado. O oxigénio dissolvido no óleo age directamente sobre o papel para acelerar seu envelhecimento. Também os produtos da oxidação do óleo actuam na degradação do papel e quando as condições favorecem a difusão do ar no óleo, a velocidade de decomposição pode ser multiplicada por um factor igual a 2,5.

Humidade: O papel *kraft* é extremamente poroso e possui uma grande afinidade pela água, cerca de 600 a 800 vezes maior do que pelo óleo isolante no qual está submerso. Durante a sua fabricação, os transformadores de alta e extra alta tensão, são secos a valores de humidade residual da ordem de 0,3% a 0,5% com relação ao peso do papel seco e para que estas características sejam preservadas, é exigido que o óleo isolante para enchimento do transformador contenha um teor de água na ordem de 10ppm¹⁰ ou menos.

De entre as fontes de humidade no papel isolante destacamos as seguintes:

- Perda da estanqueidade durante o transporte, permitindo a entrada de ar no interior do mesmo que comprometerá o isolamento a níveis que dependerão da gravidade do vazamento, tempo de exposição e condições atmosféricas.
- Montagem e instalação de acessórios no campo, factores que em função do tempo de exposição e as condições atmosféricas contribuem para o aparecimento de humidade.
- O tipo de montagem final do transformador, que influencia em muito o teor de humidade no interior do equipamento. Sistemas de montagem do tanque de expansão tipo bolsa, membrana ou drycol, são muito mais eficientes do que as do tipo respiro “natural” com sílica-gel.
- O envelhecimento do isolamento, causado pela degradação térmica da celulose, tem como um dos produtos a formação de água. A menos que a água seja extraída, a mesma acelerará ainda mais a degradação do papel.

A Figura 26 ilustra a formação de água em percentagem do peso do papel e em função da vida útil atribuída ao isolamento [2].

A humidade é um dos inimigos mais potentes do transformador. Os seus efeitos fazem-se sentir na diminuição da rigidez dieléctrica do óleo isolante, na diminuição da tensão de ruptura do papel impregnado, no envelhecimento precoce do papel, entre outros. Esta em combinação com o aquecimento degenera o sistema de isolamento sólido do transformador.

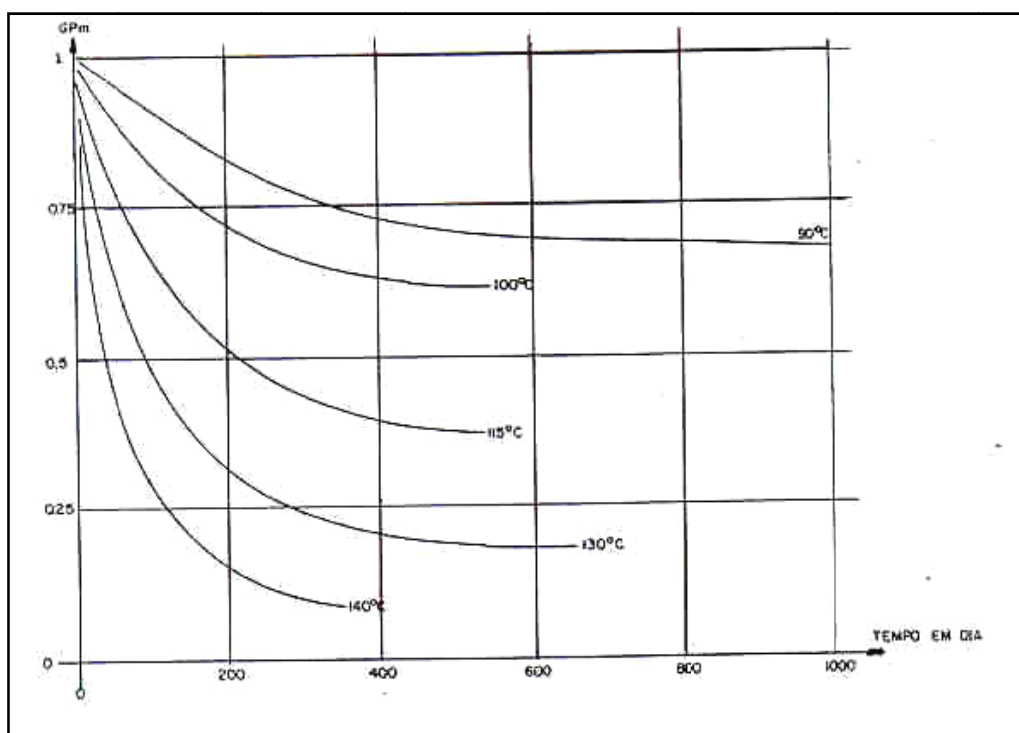


Figura 25 – Variação do grau de polimerização do papel em função da temperatura e do envelhecimento [2]

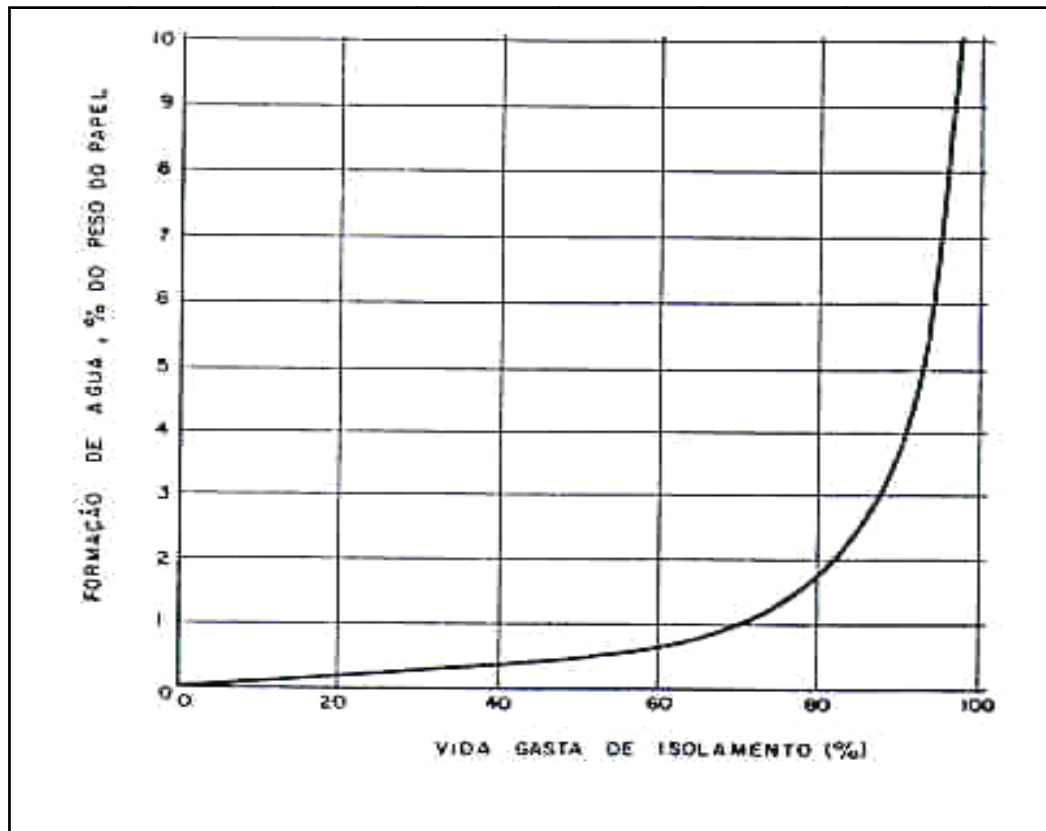


Figura 26 – Formação de água com a deterioração do papel [2]

2.1.1.2. Agentes de degradação do óleo isolante

O óleo isolante começa-se a degradar assim que o mesmo é colocado no equipamento, na fábrica, antes da expedição. A degradação pode ser dividida em contaminação e deterioração.

- Contaminação: Um óleo é considerado contaminado quando contém humidade ou outros componentes estranhos que não sejam produtos de sua oxidação.
- Deterioração: Um óleo é considerado deteriorado quando contém produtos originados de sua oxidação.

Humidade

A contaminação por humidade do óleo de um transformador em operação é devida, principalmente, pela má qualidade do sistema de montagem do tanque de expansão (principalmente má conservação da sílica gel), vazamentos no transformador e envelhecimento térmico do isolamento celulósico.

Diversas pesquisas concluíram que a água em solução não é tão nociva ao óleo, enquanto a água em estado livre é extremamente nociva por dois motivos: declínio acentuado da sua rigidez dielétrica e permite a transferência deste excedente para a celulose [2].

A Figura 27 mostra uma curva experimental do equilíbrio de humidade entre o óleo isolante e o papel.

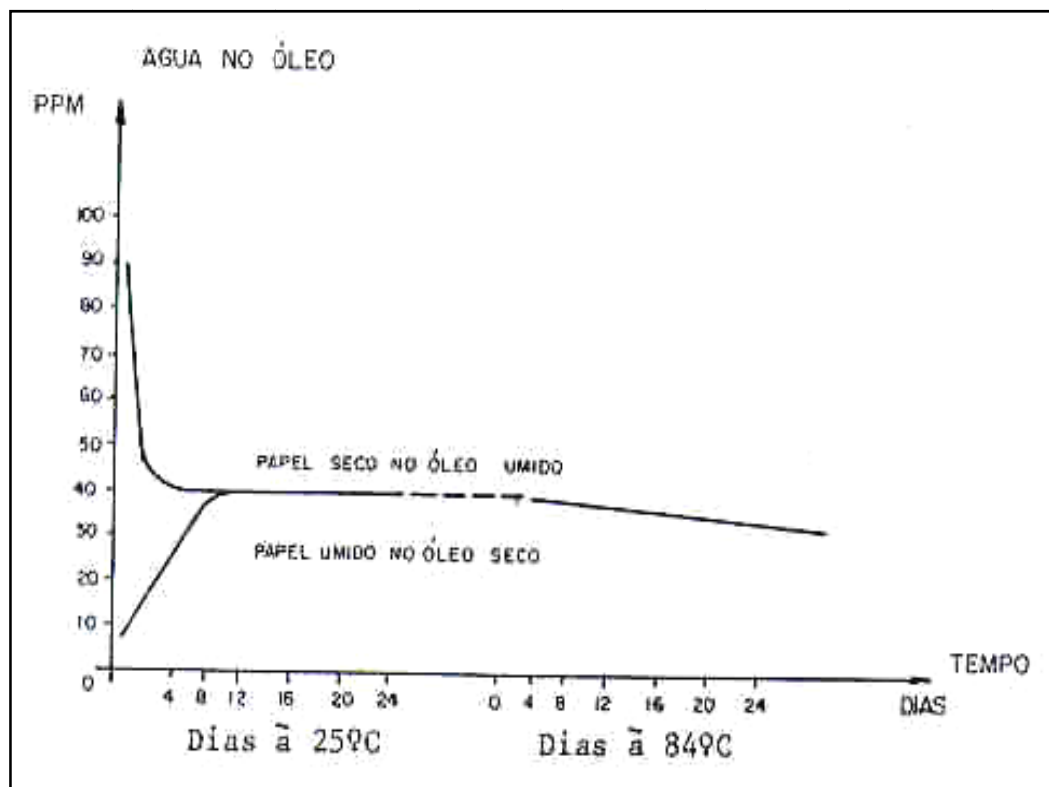


Figura 27 – Equilíbrio de humidade entre o papel *kraft* impregnado

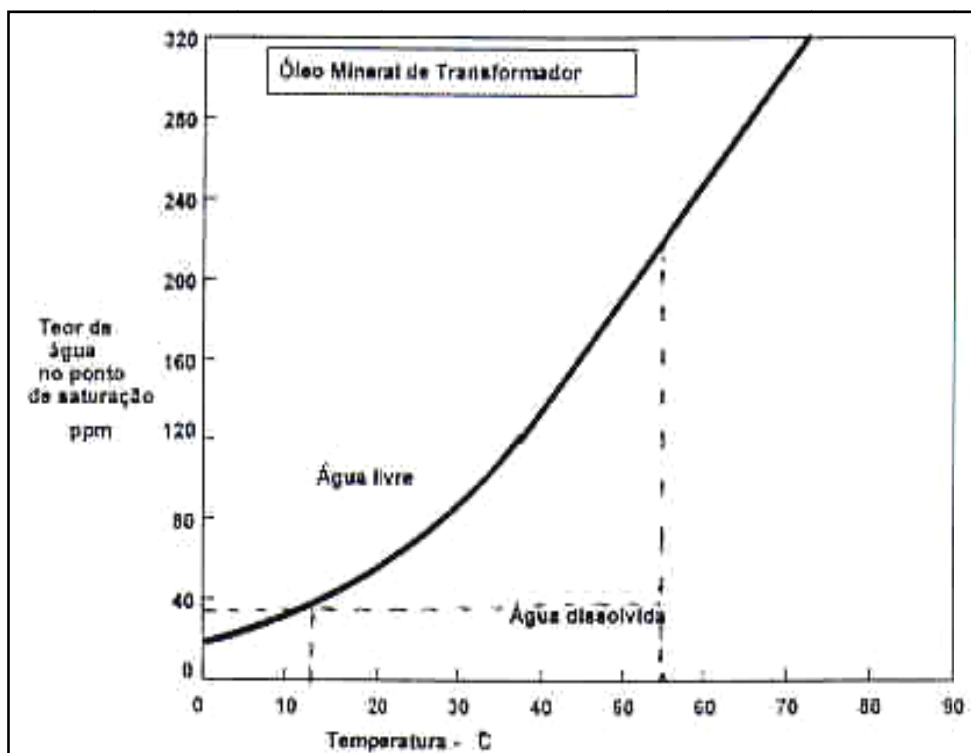


Figura 28 – Solubilidade da água em óleo isolante em função da temperatura

Vemos que o valor de 35ppm de água no óleo pode ser considerado como valor máximo admissível, a 25°C, sem que haja transferência à celulose. É importante salientar que este equilíbrio varia com o tipo de óleo e com o valor da temperatura [2].

A Figura 28 mostra que durante a sua operação normal, cerca de 55°C, o óleo do transformador poderia ter um teor de água bem acima de 35ppm sem prejuízo para o papel [2]. Entretanto, caso o mesmo venha ser desligado e o óleo arrefece, a água excedente a 35ppm poderia tornar-se água livre e ser absorvida pela celulose. Mesmo durante o funcionamento, devido às trocas de calor, há pontos de óleo-papel com temperaturas abaixo dos 55°C considerados [2].

Oxidação

A oxidação é um fenómeno um tanto complexo, que suponha-se ter início com a formação de radicais livres no óleo por liberação de hidrogénio sob efeito catalisador de metais como cobre e ferro, e da temperatura. O oxigénio, quando em contacto com o óleo, principalmente a uma temperatura relativamente elevada, combina-se quimicamente com este, alterando as suas propriedades físico – químicas na chamada deterioração ou oxidação do óleo provocando reacções de polimerização, quebra das cadeias carbónicas, condensação, etc., dando origem a todos os fenómenos relativos ao envelhecimento do óleo.

A formação de ácidos, borras e água com a oxidação, aumenta a viscosidade do óleo, dificultando a circulação e aumentando o aquecimento pela má refrigeração.

A borra é uma substância higroscópica polimérica que se deposita nas partes mais frias, sobre os enrolamentos do transformador, na forma de camadas, agindo como isolante térmico [2]. A camada directamente em contacto com o isolamento sólido está sempre com maior temperatura daquelas que a ela se sobrepõem. Esta camada endurece rapidamente e será difícil sua remoção. A formação de borra no interior do isolamento de celulose pode também provocar a contracção do isolamento, o que resulta no enfraquecimento das bobinas e numa diminuição da capacidade de absorção de solicitações mecânicas sob condições de carga do transformador [2].

O aumento da acidez do óleo com a sua deterioração, ataca os metais e principalmente os produtos orgânicos tais como o papel isolante usado na fabricação do transformador, contribuindo para a formação de radicais livres.

A água formada irá manter o processo de deterioração do óleo isolante.

O grau de oxidação do óleo é avaliado por ensaios físico – químicos que indicam a presença de resíduos (borra), presença de água, baixa rigidez dieléctrica, alta perda dieléctrica, alto índice de neutralização da acidez e baixo valor da tensão interfacial. Costuma-se caracterizar de forma definitiva a oxidação, pelos valores baixos de tensão interfacial e altos de acidez, já que os demais podem sofrer alteração com a diminuição da condição de isolamento do óleo, por exemplo, através de contaminação de partículas sólidas e humidade, mesmo inexistindo a oxidação [2].

Estudos realizados pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) em mais de 500 transformadores em operação por um período de onze anos, possibilitou montar a tabela abaixo com a classificação do óleo quanto ao valor da tensão interfacial, do número de neutralização e a existência de borra [2].

Como se viu atrás, é útil conhecer as curvas de humidade entre o óleo e o papel nas condições de equilíbrio. Quando o transformador está em equilíbrio, estas curvas proporcionam uma rápida maneira de conhecer a humidade presente no papel vaticinando futuros desaires medindo a humidade no óleo [5]. No anexo A é possível ver estes gráficos.

A utilização abusiva das curvas pode resultar em leituras erradas do teor de humidade no isolamento. As próprias curvas de equilíbrio podem variar para diferentes combinações de óleo-papel, especialmente no envelhecimento das combinações óleo-papel.

2.1.1.3. Classificação do óleo do transformador

Tabela 4 – Classificação do óleo do transformador [2]

Classe do Óleo	N.º de Neutralização Mg KOH/g	Tensão Interfacial Dina/cm	Cor	Efeitos no Transformador
Excelente	0,03 a 0,1	30 a 35	Claro	Arrefecimento eficaz e preservação do isolamento
Bom	0,05 a 0,1	27 a 29	Amarelo	Componentes polares (borra) em solução (produtos da oxidação do óleo) causam queda da tensão interfacial
Regular	0,11 a 0,15	24 a 27	Amarelo Brilhante	Ácidos gordos cobrem os enrolamentos. Borra em solução pronta para ocorrência inicial. Grande probabilidade de borra nos vazios do isolamento
Má	0,16 a 0,4	18 a 24	Laranja-Amarelo	Em quase 100 % dos transformadores nesta escala, a borra está depositada no núcleo e nas bobinas. A borra deposita-se inicialmente nas áreas das aletas
Muito má	0,41 a 0,65	14 a 18	Castanho	A borra depositada continua a oxidar e endurecer. Acontece o encolhimento do isolamento. Há grande possibilidade de falha
Extremamente má	0,66 a 1,5	9 a 14	Castanho -escuro	A borra isola as aletas de refrigeração das bobinas, bloqueia as aberturas provocando elevação da temperatura
Péssima	Acima de 1,5	6 a 9	Preto	Grandes quantidades de borra que exigirão drásticos processos de limpeza

A contaminação através da humidade é a fonte mais rápida de deterioração do óleo isolante. A formação de ácidos e borras causado pela oxidação é um problema lento, porém muito sério para o transformador. A água pode ser ao mesmo tempo o produto assim como a causa da oxidação [2].

2.1.1.4. Parâmetros controlados e valores limite

Um transformador ao ser fabricado é executada a secagem da celulose a valores de 0,3% a 0,5% de humidade relativa ¹¹ e é efectuada a impregnação com óleo isolante seco, de baixo índice de acidez, alta tensão interfacial e desgaseificado.

Para impregnação do núcleo e enchimento do transformador, os valores de humidade tolerados no óleo isolante é de no máximo 10ppm, o que é conseguido facilmente com máquinas de tratamento de óleo pelo processo termo – vácuo [2].

Para controlo da humidade nos transformadores adoptam-se os seguintes valores como limite máximo de água no óleo isolante [2]:

- Transformadores classe 230kV e acima: 25ppm;

- Transformadores classe 138kV e abaixo: 35ppm.

Caso o limite crítico de 35ppm seja atingido, deve-se retirar o óleo do transformador e proceder-se à determinação da humidade relativa na superfície do isolamento (HRSI).

Com base em resultados obtidos, associado a estudos de diversos pesquisadores, tem-se adoptado os seguintes valores máximos de HRSI para que o equipamento permaneça em operação [2]:

- Transformadores classe 230kV e acima: 1,5%;
- Transformadores classe 138kV e abaixo: 2,0%.

Para transformadores novos o limite é 0,5%, para qualquer classe de tensão. Se os valores acima forem ultrapassados, o transformador deverá ser submetido à secagem dos enrolamentos.

Como produto final da secagem são admitidos os seguintes valores máximos de HRSI [2]:

- Transformadores classe 230kV e acima: 1,0%;
- Transformadores classe 138kV e abaixo: 1,5%.

2.2. Processos de secagem de transformadores de potência

2.2.1. Secagem por Circulação de Ar Quente

- Limite teórico: 1,0% de humidade relativa;
Boa renovação do ar com humidade relativa a 110°C;
- Limite prático: 2,0% de humidade relativa;
Boa renovação do ar com humidade relativa a 110°C menos que 5%.

2.2.2. Secagem por Circulação de Ar Quente Seguida de Vazio

- Limite teórico: 0,4% de humidade relativa;
- Limite prático: 1,0% de humidade relativa.

2.2.3. Secagem por Circulação de Óleo Quente e Vazio

- A 100°C, celulose com 0,4% de humidade relativa;
Pressão parcial 10torr;
- A 100°C, óleo com 10ppm de humidade;
Pressão parcial 10torr;
- A 100°C, celulose com 6% de humidade;
Pressão parcial 400torr;
- A 100°C, óleo com 400ppm de humidade
Pressão parcial 400torr;

Portanto, a 100°C, a humidade migra, por difusão, da celulose para o óleo até 400ppm, ou, se mantivermos o óleo a 10ppm, até atingir 0,4% na celulose.

- Limite teórico: 0,5% de humidade relativa;
- Limite prático: 1,0% de humidade relativa.

Inconvenientes:

- Coeficiente de difusão muito baixo;
- Processo muito lento.

2.2.4. Secagem por “*Hot Oil Spray*”

- Limite teórico: 0,2% de humidade relativa;
Com temperatura do spray entre 100 a 110°C, e
Vazio = 3 mbar;
- Limite prático: 0,3%.

Vantagens:

- Sistema muito facilmente transportável “*on site*”;
- Extracção rápida e contínua da humidade dos isolantes;
- Atmosfera isenta de oxigénio, permite operar a temperaturas elevadas, sem envelhecimento;
- O vazio funciona como isolamento térmico da cuba;
- Quantidade de óleo envolvida reduzida e boa qualidade da secagem;
- Pré-impregnação das células de celulose, abaixamento do coeficiente de difusão e consequente estabilização dimensional dos isolantes;

Inconvenientes:

- Duração da secagem e temperaturas dependentes do posicionamento dos pulverizadores;
- Preparação do processo demorada (usa cuba do transformador);
- Redução do coeficiente de difusão para 1/10 a 1/20;
- Temperatura de secagem limitada pela destilação do óleo;
- Possibilidade de isolantes mal aquecidos (escondidos).

Se 10% do total dos isolantes ficarem mal secos (1% acima de 0,4%) teremos água suficiente para saturar o óleo. Para evitar isso, a solução será utilizar o máximo de bicos de spray possíveis (entre 18 a 25).

2.2.5. Secagem por *Vapour-Phase*

- Consiste na injeção de vapor de solvente em autoclave¹³ sob vazio;
- Necessário que a pressão do vapor de solvente (Kerosene) seja muito menor que a do vapor de água;

- Termodinamicamente é o melhor método conhecido;
- Limite teórico: 0,1%;
Com temperatura: 120 a 130°C;
Vazio: 0,5 a 0,9 mbar;
- Limite prático: 0,2%.

Vantagens:

- Atmosfera isenta de oxigénio permite operar a temperaturas mais elevadas, sem envelhecimento (ausência de óleo);
- Elevado coeficiente de difusão, portanto secagem mais rápida e contínua;
- O vapor de hidrocarboneto transportador de calor permite a plena exploração do calor de condensação;
- Transmissão do calor assegurada para as zonas escondidas e superfícies passivas;
- Desidratação contínua com distribuição de temperaturas no objecto a secar quase uniforme.

Inconvenientes:

- Preço;
- Limiar de exploração da mistura ar-solvente-vapor
 - A – Limiar inferior de explosão;
 - B – Limiar superior de explosão,
- Elevado coeficiente de difusão, portanto reabsorção mais rápida;
- Transmissão do calor mais intensa para as superfícies mais frias, onde é maior a condensação.

- Novo Processo de Secagem por Injecção de Corrente a 5 Hz (baixa frequência).

Exemplos:

1 – Transformador 1000kVA / 15kV

	Massas
Circuito magnético	840kg
Cobre	345kg
Óleo	500kg
Papel	21kg
Água nos isolantes:	
1% no papel	210g
0,1% no papel	21g
4 ppm no óleo	20g

2 – Transformador 25MVA com RC, 60/10,5kV

	Massas
Parte activa	24000kg
Óleo	10500kg
Papel	920kg
Água nos isolantes:	
1% no papel	9200g
0,05% no papel	460g
40ppm no óleo	420g

3 – Transformador 40MVA com RC, 60/31,5 kV

	Massas
Parte activa	37500 kg
Óleo	18500 kg
Papel	1470 kg
Água nos isolantes:	
1% no papel	14700 g
0,05% no papel	735 g
40 ppm no óleo	740 g

4 – Transformador 100MVA com RC, 230/69/13,2kV

	Massas
Parte activa	58000kg
Óleo	28500kg
Papel	2610kg
Água nos isolantes:	
1% no papel	26100g
0,05% no papel	1305g
40ppm no óleo	1140g

5 – Transformador 120MVA com RC, 132/33kV

	Massas
Parte activa	66000kg
Óleo	26000kg
Papel	2850kg
Água nos isolantes:	
1% no papel	28500g
0,05% no papel	1425g
40ppm no óleo	1040g

2.3. Processo de secagem de milho

Para melhor compreender os processos de secagem foram realizadas pesquisas a processos de secagem mas em cereais. Para tal, explorei duas simulações de secagem de milho ([18] e [19]).

Em termos práticos não obtive grandes resultados, mas adquiri um know-how em termos de secagem assim como de todos os aspectos que englobam as temperaturas de secagem e de humidades relativas.

2.4. Processo de Secagem por *Hot Oil Spray*

Este tratamento consiste na aplicação simultânea de vácuo, de cerca 5 a 10mmHg, e dum *spray* de óleo quente, de modo a atingir-se uma temperatura entre cerca de 90 e 100°C nos enrolamentos, temperatura esta a controlar, por exemplo através da medida da resistência dos enrolamentos [1]. Por razões operacionais, nos tratamentos realizados fora da fábrica, designadamente nos locais onde os transformadores se encontram instalados, pode-se optar pela realização de vários ciclos de aquecimento à parte activa do transformador (núcleo e enrolamentos), através da aplicação dum *spray* de óleo quente, seguida de drenagem do óleo e aplicação de vácuo, aos isolantes sólidos pré-aquecidos. Usualmente, são necessários vários ciclos, para uma secagem adequada dos enrolamentos, dependendo do número de ciclos, das dimensões (com especial relevo para a espessura do isolante sólido) e ainda do conteúdo da humidade inicial existente neste e do conteúdo de humidade final que se pretende alcançar com o tratamento [1]. O processo completo pode demorar algumas semanas. O *Hot Oil Spray* tem sido usado, com sucesso, na secagem dos isolantes sólidos do transformador, com especial destaque para o papel dos enrolamentos. Na parte final do tratamento, após a paragem do *spray* de óleo, o transformador é submetido a um vácuo mais elevado (cerca de 1mmHg) ou melhor (pressão mais baixa), para assegurar uma secagem final mais adequada, o que se traduz no fim do tratamento pela obtenção de um ponto de orvalho¹² geralmente inferior a -25°C, com a temperatura dos enrolamentos não inferior a 90°C, e um vácuo inferior a 10mmHg [1]. O *spray* deve ser tal que produza uma atomização fina do óleo, de modo a criar uma espécie de nevoeiro muito fino, com elevada capacidade de penetração e que consiga transportar o calor a todas as zonas dos enrolamentos [1]. Este método é muito eficaz nos casos em que o *spray* de óleo quente consegue alcançar todas as zonas do transformador, incluindo as zonas do enrolamento de mais difícil acesso, junto do núcleo. Para transformadores usados, sempre que o tratamento tenha que ser realizado no local de instalação do transformador, é este o tratamento mais eficaz para a realização da secagem dos enrolamentos, permitindo atingir, no caso de transformadores novos, o mesmo grau de secagem que o método de secagem em fase de vapor (*vapour-phase*), embora para tal o método de *Hot Oil Spray* exija uma duração de tratamento muito superior àquele [1]. De referir ainda que o óleo usado no *spray* não deve ser aproveitado para o enchimento do transformador.

2.4.1. Estação de secagem por *Hot Oil Spray*

Instalação Hedrich/Efacec com as seguintes características:

- Capacidade do grupo de vácuo: 3000m³/h, a 0,1mbar
- Capacidade de aquecimento do óleo para *spray*: 300kW
- Circulação do óleo para *spray*: 40000l/h, a 2bar nos pulverizadores

A estação de secagem por *Hot Oil Spray* é composta por duas autoclaves cada uma com um volume de 190m³ e 18 pulverizadores (Figura 29). É nelas que são colocados os materiais a que se vai realizar o processo de secagem.



Figura 29 – Autoclave 1

O processo de secagem *Hot Oil Spray* é composto por 5 grandes grupos, para além das duas autoclaves:

- Unidade de vácuo (Figura 30);
- Unidade de aquecimento (Figura 31);
- Unidade de distribuição de óleo (Figura 32);
- Unidade de monitorização (Figura 33);
- Aquecimento de óleo.



Figura 30 – Unidade de vácuo



Figura 31 – Unidade de aquecimento



Figura 32 – Parte da unidade de distribuição de óleo



Figura 33 – Unidade de monitorização

2.4.2. Descrição dos processos:

O processo de secagem é composto pelas seguintes fases:

1. Preparação da secagem

Colocar o material a secar sobre a plataforma e deslocá-la para dentro da autoclave. Instalar 4 termopares distribuídos pelos isolantes e bobinas posicionados na autoclave. A quantidade de material a secar em cada ciclo é decidida pelo chefe de equipa. Os tubos de cartão isolante e as bobinas devem ser colocados na posição vertical.

2. Fase de pré-secagem (Evacuação)

Fechar a porta da autoclave e iniciar o aquecimento das paredes, com a temperatura regulada para 110°C.

Evacuar a autoclave, usando o grupo de vácuo até atingir uma pressão interna inferior a 10mbar.

Esta fase do processo terá uma duração de referência de cerca de 2 horas.

Uma vez atingidos os critérios, mesmo que as 2 horas não tenham decorrido, passa-se à fase seguinte.

3. Fase de aquecimento por *Hot Oil Spray* (Spray de Óleo)

Ligar a bomba de circulação do óleo, sendo este posto a circular entre o aquecedor e a autoclave. Passando pelos pulverizadores é lançado em spray sobre o material a secar, aquecendo-o.

As paredes devem ser aquecidas a 110°C nesta fase, que deve ter uma duração mínima de 15 horas.

Durante as primeiras 4 horas, a temperatura do óleo deve ser regulada para 80°C (devido a não romper o papel). Nas restantes 11 horas, a temperatura deve subir para os 115°C.

Durante esta fase o vácuo deve ser mantido o mais baixo possível, mas ≥ 3 mbar.

4. Fase de vácuo final (Vácuo Fino)

Parar a circulação do óleo e remover o óleo de dentro da autoclave, mantendo o grupo de vácuo em funcionamento.

Evacuar a autoclave, mantendo o grupo de vácuo a funcionar durante mais 15 horas no mínimo - fase de vácuo fino - até atingir uma pressão interna igual ou inferior a 1mbar.

Em processos de secagem contínuos a decorrer durante o fim-de-semana, a duração desta fase pode ser aumentada até 30 horas.

5. Fim da Secagem

Ler os valores da pressão e temperatura mínima dentro da autoclave nos diferentes indicadores.

Fazer a comparação dos valores lidos com os critérios de fim de processo.

Se estes não tiverem sido atingidos, perguntar ao chefe de equipa qual o procedimento a ser utilizado.

Uma vez atingidos os critérios de fim de processo, quebrar o vácuo com ar seco e ligar o circuito de exaustão da autoclave durante 2 horas, antes de abrir a porta.

2.4.3. Quadros síntese para o processo de secagem *Standard* por *Hot Oil Spray*

Tabela 5 – Fases do processo de secagem *Standard*

		FASES DO PROCESSO				
PARÂMETROS		FASE 0	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
		AR QUENTE	EVACUAÇÃO	VÁCUO INTERMÉDIO	SPRAY ÓLEO	VÁCUO FINAL
Duração (h)		0	2	0	15	15
Temperatura das sondas TE-1.1.1 / TE-1.1.2 / TE-1.1.3 / TE-1.1.4		0			≥ 110	
Vácuo [mbar] REGULAÇÃO	Pmax		< 10	0	< 5	≤ 1
	Pmin		5		3	
Pressão Óleo [°C]					2	
Temperatura Paredes [°C]		0	110	0	110	0
Temperatura Spray Óleo [°C]	Fase 3.1				80	4h
	Fase 3.2				115	11h
	Fase 3.3				0	0
	Fase 3.4				0	0
	Fase 3.5				0	0
Temperatura Pré-Aquecimento [°C]	1,0h		110			
Ponto de Orvalho [°C]						< -50

* PROCESSOS DE SECAGEM CONTÍNUOS DURANTE O FIM DE SEMANA DEVERÃO TER UMA FASE DE VÁCUO FINAL DE DURAÇÃO ATÉ 30 HORAS

Tabela 6 – Tabela com explicação das diferentes fases do processo

FASE	PROCESSO	CRITÉRIOS FINAIS
Evacuação	Vácuo Aquecimento das paredes da cuba a 110°C	Vácuo < 20 mbar
Spray de Óleo	Spray de óleo a 115°C Vácuo Aquecimento das paredes da cuba a 110°C	15 horas: 4 Horas a 80°C 11 Horas a 115°C
Vácuo Final	Vácuo	15 Horas Vácuo Final estabilizado ≤ 1 mbar Temperatura do material > 90°C

2.4.4. Esquema de princípio da instalação de secagem por *Hot Oil Spray*

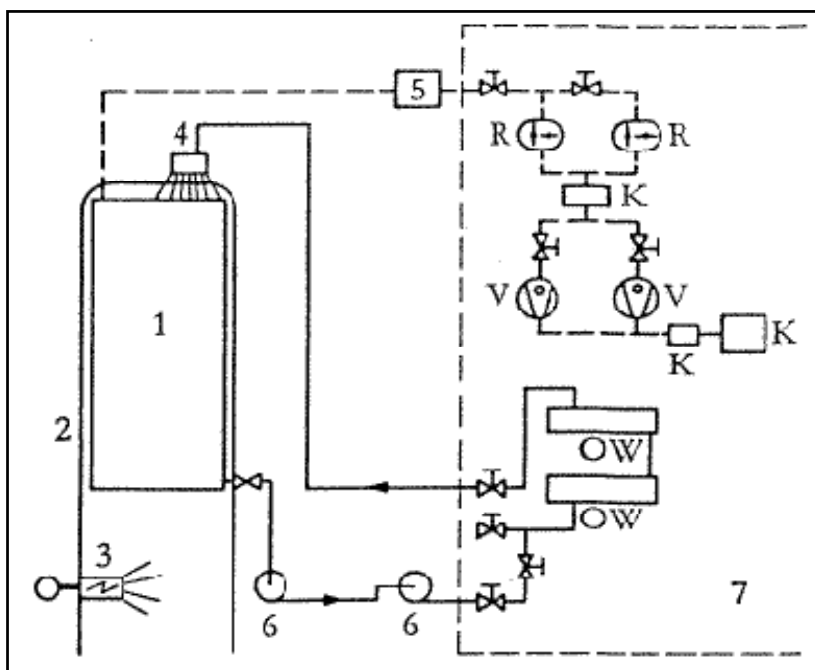


Figura 34 – Esquema de princípio da instalação de secagem por *Hot Oil Spray*

Legenda:

- 1 – Transformador
- 2 – Isolamento térmico
- 3 – Aquecimento
- 4 – Distribuição de óleo
- 5 – Condensador de óleo

- 6 – Bombas de circulação de óleo
- K – Condensadores
- R – Bomba *Roots*¹⁴ de 800m³/h
- V – Bomba de Anel Líquido¹⁵ de 100m³/h
- OW – Aquecedor de óleo

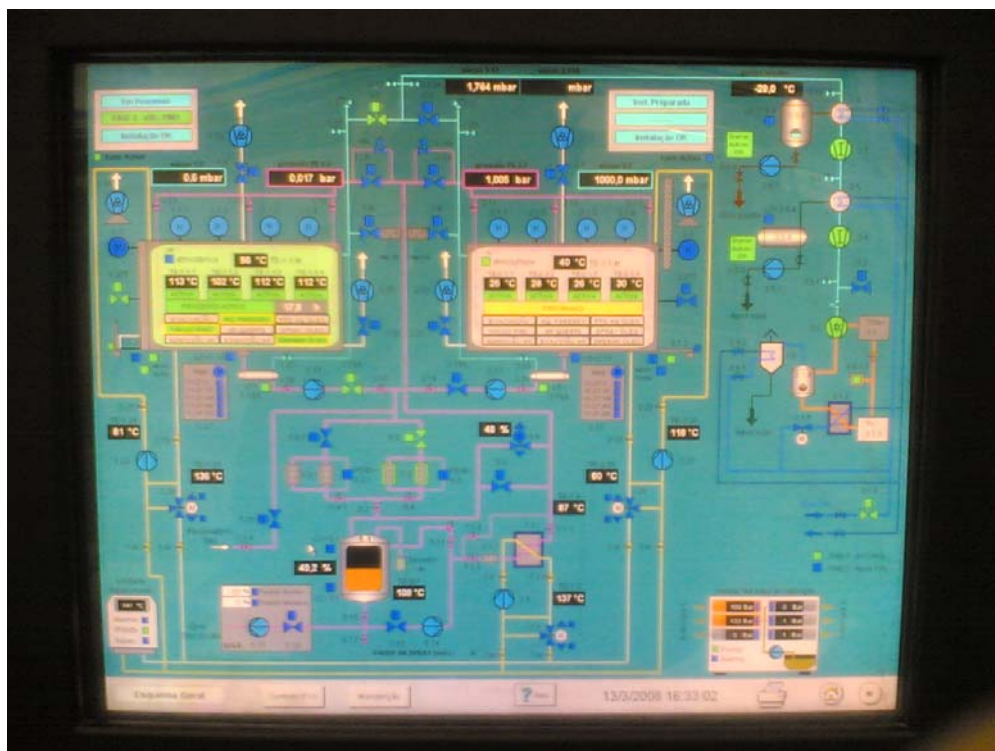


Figura 35 – Esquema geral da instalação de secagem por *Hot Oil Spray* na unidade de monitorização

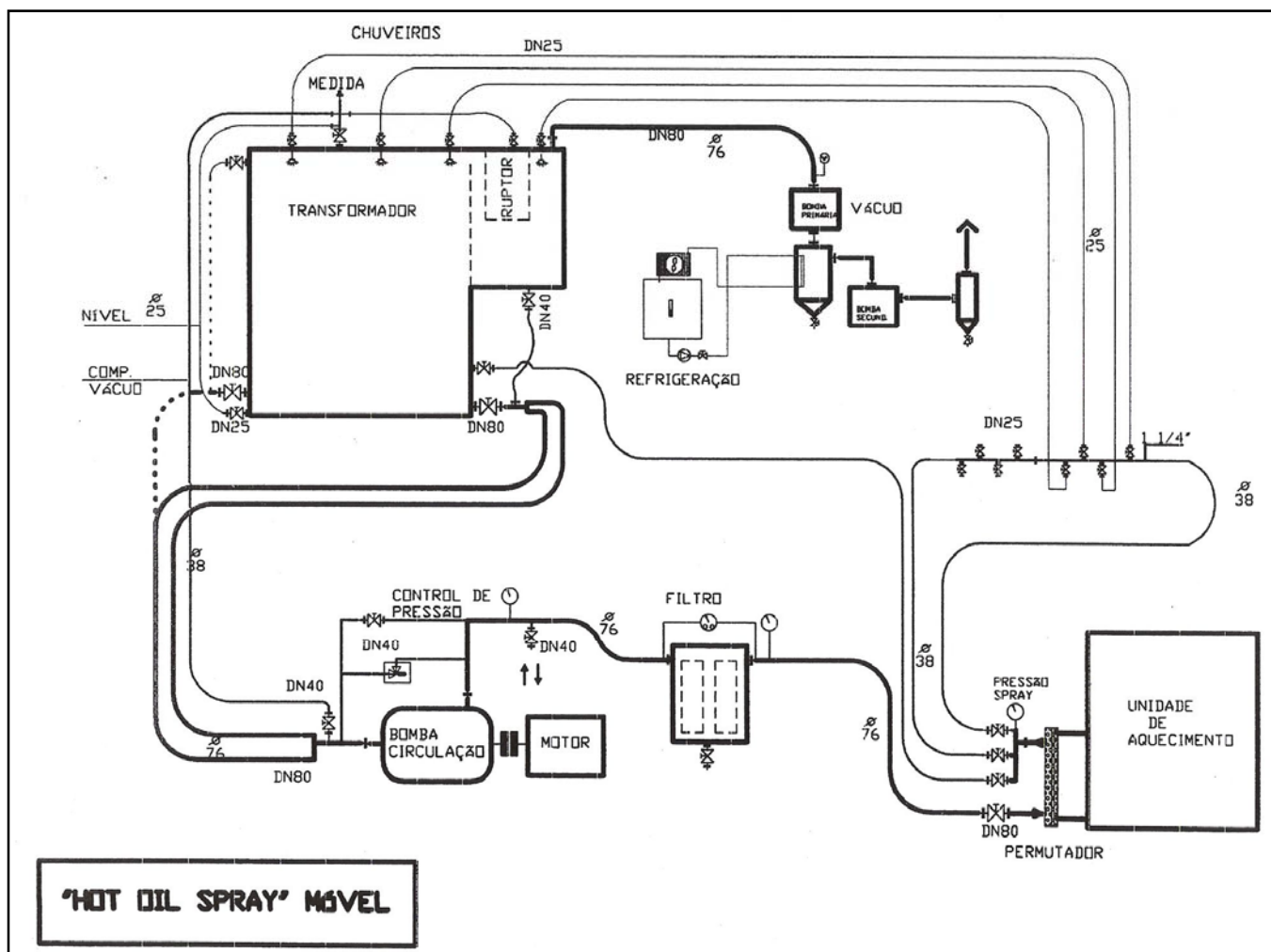


Figura 36 – Esquema de uma instalação de *Hot Oil Spray* Móvel

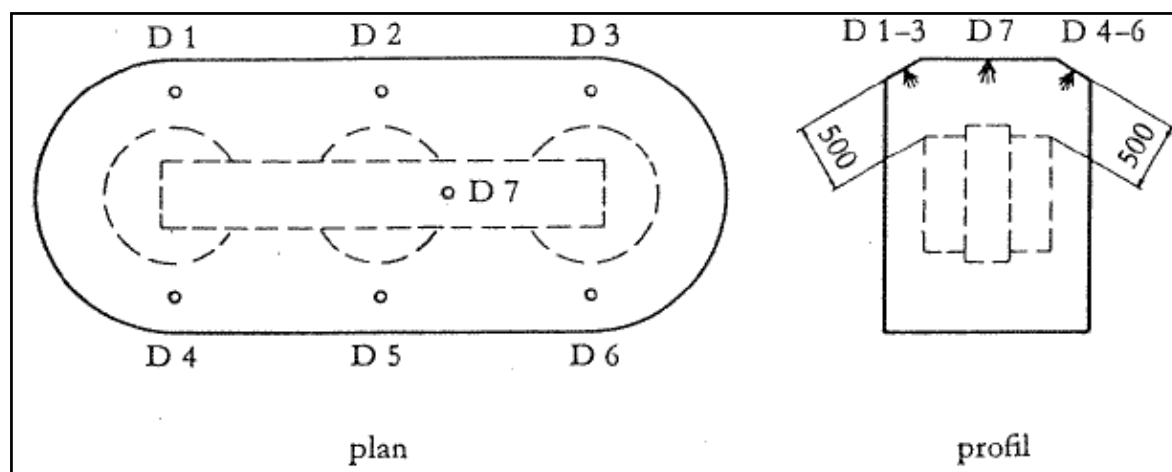


Figura 37 – Disposição dos bicos pulverizadores num transformador trifásico

3. Procedimentos experimentais

3.1. Objectivos

Validar um novo processo de secagem que denominaremos por *Termo-Spray* em substituição do processo normal denominado *Standard*. Para tal foram executados dois ensaios, o primeiro com o processo *Standard* e o segundo com o processo *Termo-Spray*, para testar e comparar o envelhecimento do papel.

3.2. Quadros síntese para o processo de secagem *Termo Spray* por *Hot Oil Spray*

Neste novo processo, em relação ao processo *Standard*, há as seguintes modificações:

- A fase inicial terá 14 horas de ar quente com uma temperatura das paredes regulada para 130°C. Uma vez atingido o critério das 14 horas passa-se à fase seguinte.
- Na fase 1 evacuou-se a autoclave, usando o grupo de vácuo até atingir uma pressão interna inferior a 20mbar.
Esta fase do processo terá uma duração de referência de 2 horas. Uma vez atingidos os critérios, mesmo que as 2 horas não tenham decorrido, passa-se à fase seguinte.
- Na fase 2 inicia-se o aquecimento das paredes com uma temperatura regulada para 110°C. Mantém-se o grupo de vácuo em funcionamento durante 3 horas até atingir uma pressão interna inferior a 5mbar.
- Na fase 3 liga-se a bomba de circulação do óleo, sendo este posto a circular entre o aquecedor e a autoclave. Passando pelos pulverizadores é lançado em *spray* sobre o material a secar, aquecendo-o.
As paredes devem ser aquecidas a 110°C nesta fase, que deve ter uma duração mínima de 7 horas. A temperatura do óleo deve subir para os 115°C.
Durante esta fase o vácuo deve ser mantido entre os 3mbar e os 5mbar.
- Na fase 4 pára-se a circulação do óleo e remove-se o óleo de dentro da autoclave, mantendo o grupo de vácuo em funcionamento durante 5 horas até atingir uma pressão interna igual ou inferior a 1mbar.

Tabela 7 – Fases do processo de secagem *Termo-Spray*

		FASES DO PROCESSO				
		FASE 0	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
PARÂMETROS		AR QUENTE	EVACUAÇÃO	VÁCUO INTERMÉDIO	SPRAY ÓLEO	VÁCUO FINAL
Duração (h)		14	2	3	7	5*
Temperatura das sondas TE-1.1.1 / TE-1.1.2 / TE-1.1.3 / TE-1.1.4		110			≥ 110	
Vácuo [mbar] REGULAÇÃO	Pmax		< 20	<5	< 5	≤ 1
	Pmin		10		3	
Pressão Óleo [°C]					2	
Temperatura Paredes [°C]		130	110	110	110	0
Temperatura Spray Óleo [°C]	Fase 3.1				115	7h
	Fase 3.2				0	0
	Fase 3.3				0	0
	Fase 3.4				0	0
	Fase 3.5				0	0
Temperatura Pré-Aquecimento [°C]	1,0h			100		
Ponto de Orvalho [°C]						< -50

* PROCESSOS DE SECAGEM CONTÍNUOS DURANTE O FIM DE SEMANA DEVERÃO TER UMA FASE DE VÁCUO FINAL DE DURAÇÃO ATÉ 30 HORAS

Tabela 8 – Tabela com explicação das diferentes fases do processo

FASE	PROCESSO	CRITÉRIOS FINAIS
Ar Quente	Aquecimento das paredes da cuba a 130°C	14 Horas
Evacuação	Aquecimento das paredes da cuba a 110°C	Vácuo < 5 mbar
Spray de Óleo	Spray de óleo a 115°C Vácuo Aquecimento das paredes da cuba a 110°C	7 Horas a 115°C
Vácuo Final	Vácuo	5 Horas Vácuo Final Estabilizado ≤ 1 mbar Temperatura do material > 90°C

3.3. Preparação dos ensaios

Devido a serem ensaios complexos e a envolverem vários recursos e diferentes equipas, foi necessário conjugar muito bem todo o pessoal, desde chefes de equipa passando pelo pessoal do laboratório, que disponibilizou o *Vanguard*³, um aparelho que mede a resistência da bobina durante o ensaio. Assim sendo, os ensaios foram planeados com uma semana de antecedência de modo a não haver falhas.

3.3.1. Ensaio 1: Processo de secagem *Standard*

3.3.1.1. Preparação dos provetes

Os provetes vindos da bobinagem eram de cartão diferente:

- 2,5mm de cartão duro;
- 5mm de cartão extra-duro.

Seguidamente foram pesados no laboratório de modo a obter-se 1000g de cada tipo de provetes. Posteriormente foram colocados no *vapour-phase* e mal foi concluído o processo foram levados para o laboratório para serem novamente pesados (Figura 38).

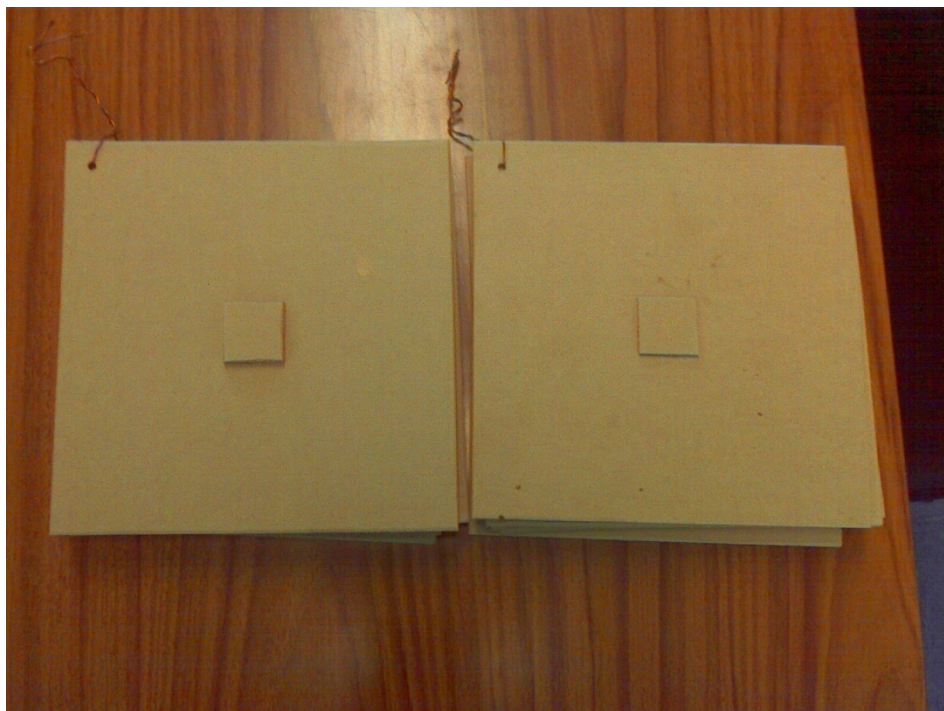


Figura 38 – Provetes depois do *vapour-phase*

3.3.1.2. Preparação da bobina

A bobina seleccionada para o primeiro ensaio foi uma Bobina AT / 120 MVA com o código E8010295 AT.

Nesta fase, foi medida, através do *Vanguard*, a resistência da bobina a seco (Figura 39). Foi também retirado papel, na quantidade de 4g, para mandar para o Labelec¹⁶ – Estudos, Desenvolvimento e Actividades Laboratoriais, S.A., laboratório situado em Lisboa, de modo a medir o envelhecimento do papel.

Seguidamente a bobina foi colocada na autoclave, juntamente com os provetes e também foram feitas todas as ligações do *Vanguard* à bobina assim como deste aos cabos existentes na cuba (Figura 41 e Figura 42). No final do processo de secagem foram retirados os provetes e levados para o laboratório para serem pesados, assim como também foi retirado papel da bobina para também ser levado para o Labelec com a primeira amostra (Figura 43 e Figura 44).

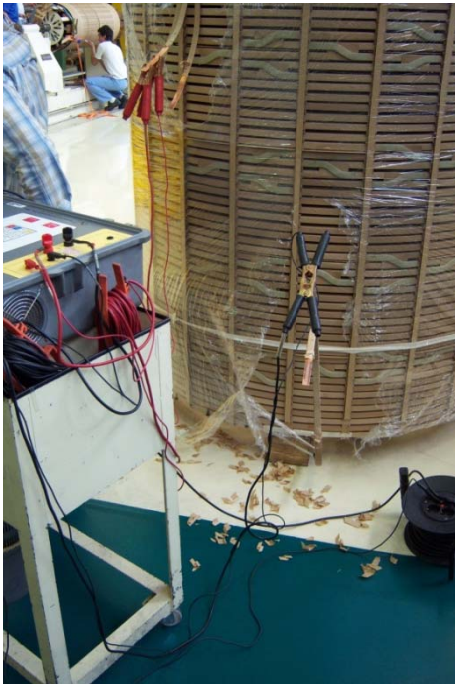


Figura 39 – Medição da resistência a seco através do *Vanguard*

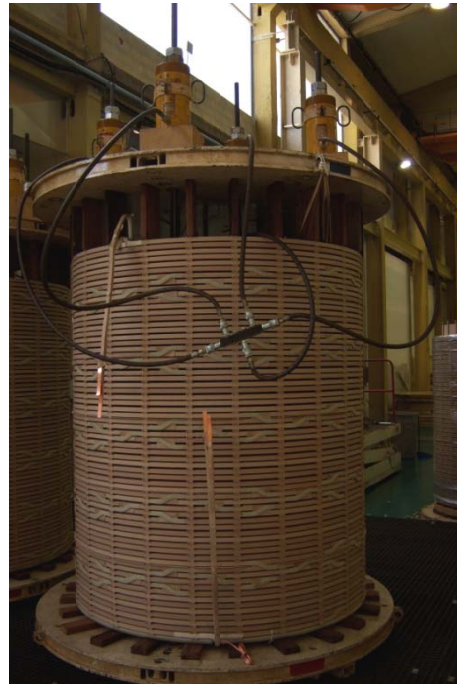


Figura 40 – Bobina pré-carregada com os pneumáticos e pronto a entrar na cuba



Figura 41 – Ligações dos cabos aos terminais do transformador



Figura 42 – Vanguard ligado no exterior

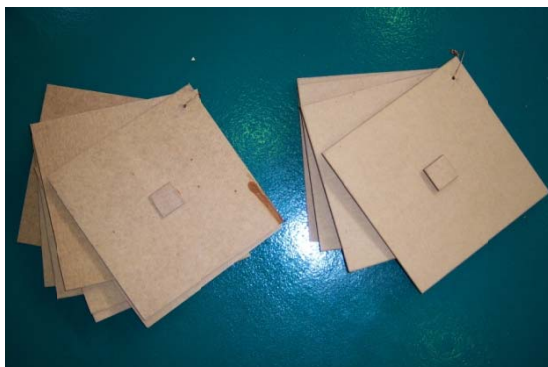


Figura 43 – Provetes depois de terem saído do *Hot Oil Spray* e de terem sido pesados



Figura 44 – Papel retirado da bobina depois do processo de secagem *Standard*

Seguidamente foram efectuadas medições diárias aos provetes para ver o seu poder de absorção de humidade. Este processo deveria ter uma duração de 3 meses no entanto e visto que as pesagens continuam a ser efectuadas, neste trabalho só serão apresentadas até ao dia disponível. No entanto, é de realçar que os principais valores são os do primeiro mês pois é quando há mais absorção de humidade por parte do papel.

3.3.1.3. Resultados obtidos

Valor da resistência medida a seco: 1,206 Ω .

Tabela 9 – Registo da resistência dos enrolamentos

Data		Tempo (h)	Resistência (Ω)	Temperatura Cobre (°C)	Temperatura <i>Spray</i> (°C) TE-7.9	Temperatura Cuba (°C) TE-1.1M	Sondas (°C) TE-1.1.2	
14-05-2008	2h	0	1,206	24,8	80	29	30	
	4h	2	1,214	26,5	79	64	37	
	5h	3	1,313	47,9	80	80	68	
	6h	4	1,38	62,3	80	86	78	
	7h	5	1,414	69,6	85	89	84	
	8h	6	1,46	79,5	90	91	90	
	9h	7	1,509	90,1	109	96	103	
	10h	8	1,538	96,3	113	101	111	
	11h	9	1,577	104,7	115	104	114	
	12h	10	1,594	108,4	115	105	117	
	13h	11	1,605	110,8	115	107	117	
	14h	12	1,612	112,3	115	107	117	
	15h	13	1,615	112,9	115	107	117	
	16h	14	1,617	113,3	115	107	117	
	17h	15	1,619	113,8	115	107	117	
	18h	16	1,62	114,0	115	107	117	
	19h	17	1,619	113,8	115	107	117	
	20h	18	1,615	112,9	90	104	115	
	21h	19	1,61	111,8	88	101	114	
	22h	20	1,605	110,8	87	98	112	
	23h	21	1,597	109,0	86	96	109	
	15-05-2008	0h	22	1,592	108,0	83	94	107
		1h	23	1,587	106,9	81	91	104
2h		24	1,582	105,8	79	88	103	
3h		25	1,577	104,7	78	86	102	
4h		26	1,573	103,9	76	85	100	
5h		27	1,569	103,0	75	84	98	
6h		28	1,558	100,6	74	82	95	
7h		29	1,551	99,1	74	80	93	
8h		30	1,55	98,9	72	79	91	
9h		31	1,545	97,8	70	77	90	
10h		32	1,541	97,0	70	76	89	

O cálculo do valor do cobre foi realizado através da seguinte fórmula:

$$T_2 = \frac{R_2 \times (235 + T_1)}{R_1} - 235$$

O valor 235 vem de:

$$R = \rho \times \frac{1}{S}$$

em que, S é o comprimento da secção.

$$R_\theta = R_{20}[1 + \alpha \times (\theta - 20)]$$

em que,

α é a variação ρ por °C (entre 1 e 20°C)

R_{20} é a resistividade a 20°C.

Os valores da Temperatura do Cobre, da Temperatura do *Spray*, da Temperatura da Cuba assim como da Temperatura da Sondas foram retirados do gráfico que o sistema de monitorização disponibiliza no final do processo (Figura 49).

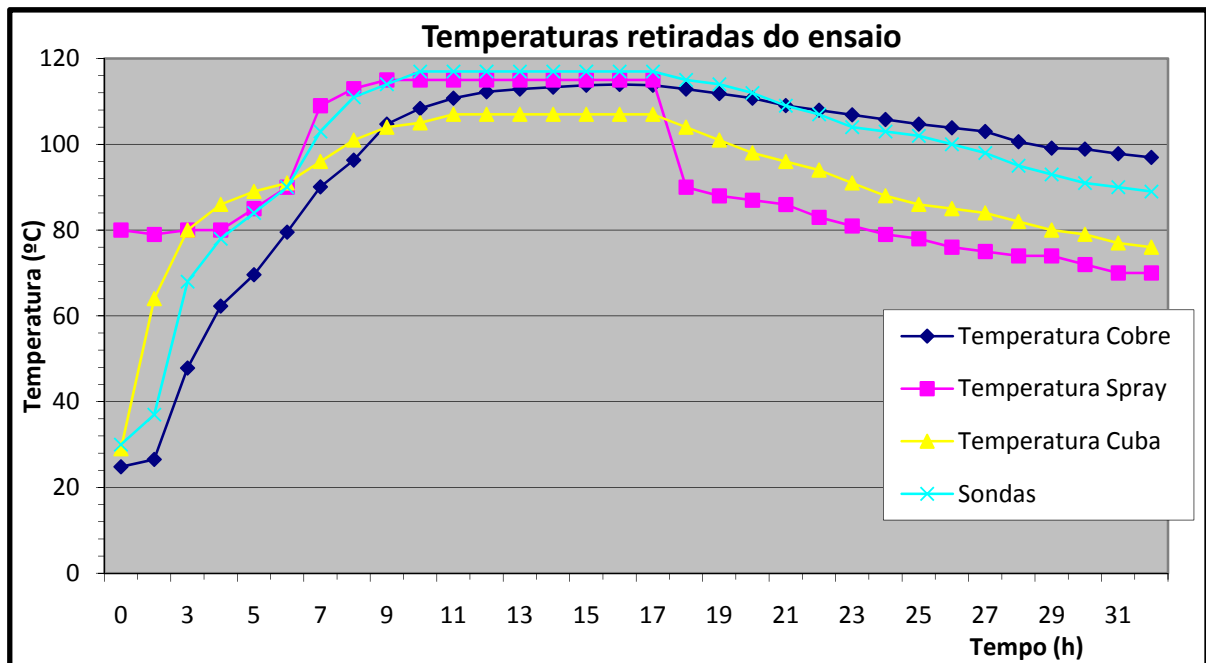


Figura 45 – Gráfico com valores retirados do ensaio

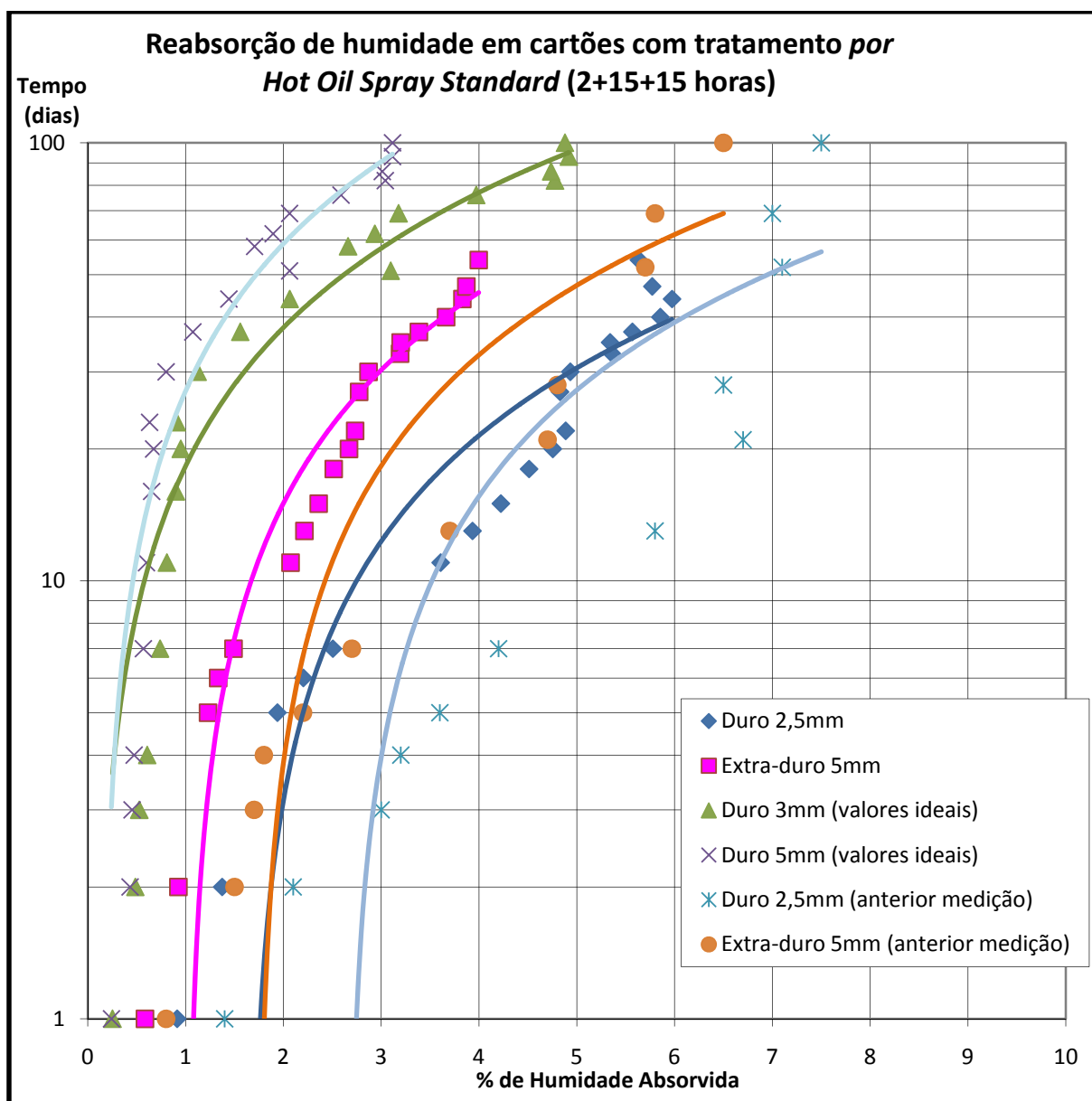


Figura 46 – Reabsorção da humidade em cartões com tratamento por *Hot Oil Spray Standard*

		Provetes							
		Duro 2,5 mm				Extra-Duro 5 mm			
Massa (g) Inicial		967,41				1024,7			
Massa (g) após Vapour-Phase		919,81				987,01			
% H ₂ O Inicial		4,92				3,68			
Após o Spray de Óleo		Massa(g)	% H ₂ O	Massa Óleo (g)	% Óleo	Massa(g)	% H ₂ O	Massa Óleo (g)	% Óleo
Data	15-05-2008	989,21	-	69,4	7,5	1042,74	-	55,73	5,6
Data	16-05-2008 1 dia	997,62	0,91	-		1048,51	0,58	-	
Data	17-05-2008 2 dias	1001,85	1,4	-		1051,88	0,93	-	
Data	19-05-2008 5 dias	1007,05	1,9	-		1054,88	1,2	-	
Data	20-05-2008 6 dias	1009,49	2,2	-		1055,9	1,3	-	
Data	21-05-2008 7 dias	1012,26	2,5	-		1057,45	1,5	-	
Data	26-05-2008 11 dias	1022,4	3,6	-		1063,2	2,1	-	
Data	28-05-2008 13 dias	1025,4	3,9	-		1064,6	2,2	-	
Data	30-05-2008 15 dias	1028,06	4,2	-		1066,04	2,4	-	
Data	02-06-2008 18 dias	1030,72	4,5	-		1067,56	2,5	-	
Data	04-06-2008 20 dias	1032,95	4,8	-		1069,1	2,7	-	
Data	06-06-2008 22 dias	1034,16	4,9	-		1069,72	2,7	-	
Data	11-06-2008 27 dias	1033,63	4,8	-		1070,12	2,8	-	
Data	13-06-2008 30 dias	1034,6	4,9	-		1071,07	2,9	-	
Data	16-06-2008 33 dias	1038,51	5,4	-		1074,25	3,2	-	
Data	18-06-2008 35 dias	1038,34	5,3	-		1074,31	3,2	-	
Data	20-06-2008 37 dias	1040,43	5,6	-		1076,15	3,4	-	
Data	23-06-2008 40 dias	1043,06	5,9	-		1078,9	3,7	-	
Data	27-06-2008 44 dias	1044,16	6,0	-		1080,54	3,8	-	
Data	30-06-2008 47 dias	1042,29	5,8	-		1080,94	3,9	-	
Data	07-07-2008 54 dias	1041,05	5,6	-		1082,19	4,0	-	

Figura 47 – Medições realizadas aos provetes

Fórmulas utilizadas nos cálculos [5]:

$$\%H_2O_Inicial = \frac{Massa_Inicial - Massa_após_Vapour - Phase}{Massa_Inicial} \times 100$$

$$Massa_Óleo = Massa - Massa_após_Vapour - Phase$$

$$\%Óleo = \frac{Massa - Massa_após_Vapour - Phase}{Massa_após_Vapour - Phase} \times 100$$

$$\%H_2O = \frac{(Massa - Massa_Óleo) - Massa_após_Vapour - Phase}{Massa_após_Vapour - Phase} \times 100$$

PROG-NO:	2	PARAMETROS DO PROCESSO DE SECAGEM - AUTOCLAVE 1										1	MODULO 1
PROG-NO:	2	FASE 0		FASE 1		FASE 2		FASE 3		FASE 4			
PARAMETROS / ACTUAIS		AR QUENTE		EVACUAÇÃO		VÁCUO INTERMÉDIO		SPRAY ÓLEO		VÁCUO FINAL			
Duração [h]	32,00 32,02	0,00 0,00	2,00 2,03	0,00 0,00	15,00 15,00	15,00 14,99							
Temperatura de Processo [°C]	0												
TE-1.1.1 TE-1.1.2 max	29 30	36 37	36 37	117 117	81 89								
TE-1.1.3 TE-1.1.4 92	29 ***	32 ***	32 ***	118 ***	92 ***								
Vácuo [mbar] setup { max min		< 10,00 5,00 21,89	< 0,00 11,32	5,00 3,00 4,11	< 1,00 0,31								
Pressão Spray de Óleo [bar]				2,00 0,1									
Temp. Parede Autoclave [°C]	0 28	110 66	0 66	110 106	0 76								
Temperatura Spray de Óleo [°C] / [h]	Fase 3.1				80 87 4,00 4,01								
	Fase 3.2				115 115 11,00 10,99								
	Fase 3.3				0 0 0,00 0,00								
	Fase 3.4				0 0 0,00 0,00								
	Fase 3.5				0 0 0,00 0,00								
Temp. Pre-Aquecimento Spray de Óleo [°C]	Antes do spray 1,0 h	80 92	0 92										
Ponto de Orvalho [°C]					< -20,00 -67,7								

UNIDADE CALIBRAÇÃO HIDRÁULICA			
Pressão [bar]	Circuito 1	Max. 0 0,6	COMP OFF
	OFF	Actual 0	DECOMP OFF
	Min. 0		
	Circuito 2	Max. 120 118,3	COMP ON
	ON	Actual 108	DECOMP OFF
	Min. 108		
Circuito 3	Max. 100 96,2	COMP ON	
	ON	Actual 88	DECOMP OFF
Min. 88			

Isolantes	E8010295A
Enrolamento AT	E8010278A
Enrolamento BT	E8010
Enrolamento Regulação	E8010269A+E8010295A
Enrolamento (...)	E8010290a (Serie)

Parâmetros	CARREGAR DADOS Programa do Servidor	ACEITAR PROGRAMA	Gravar Parâmetros NO PROGRAMA	Help	15/5/2008 09:59:14			
------------	-------------------------------------	------------------	-------------------------------	------	--------------------	--	--	--

Figura 48 – Quadro retirado do sistema de monitorização com os parâmetros do processo de secagem *Standard*

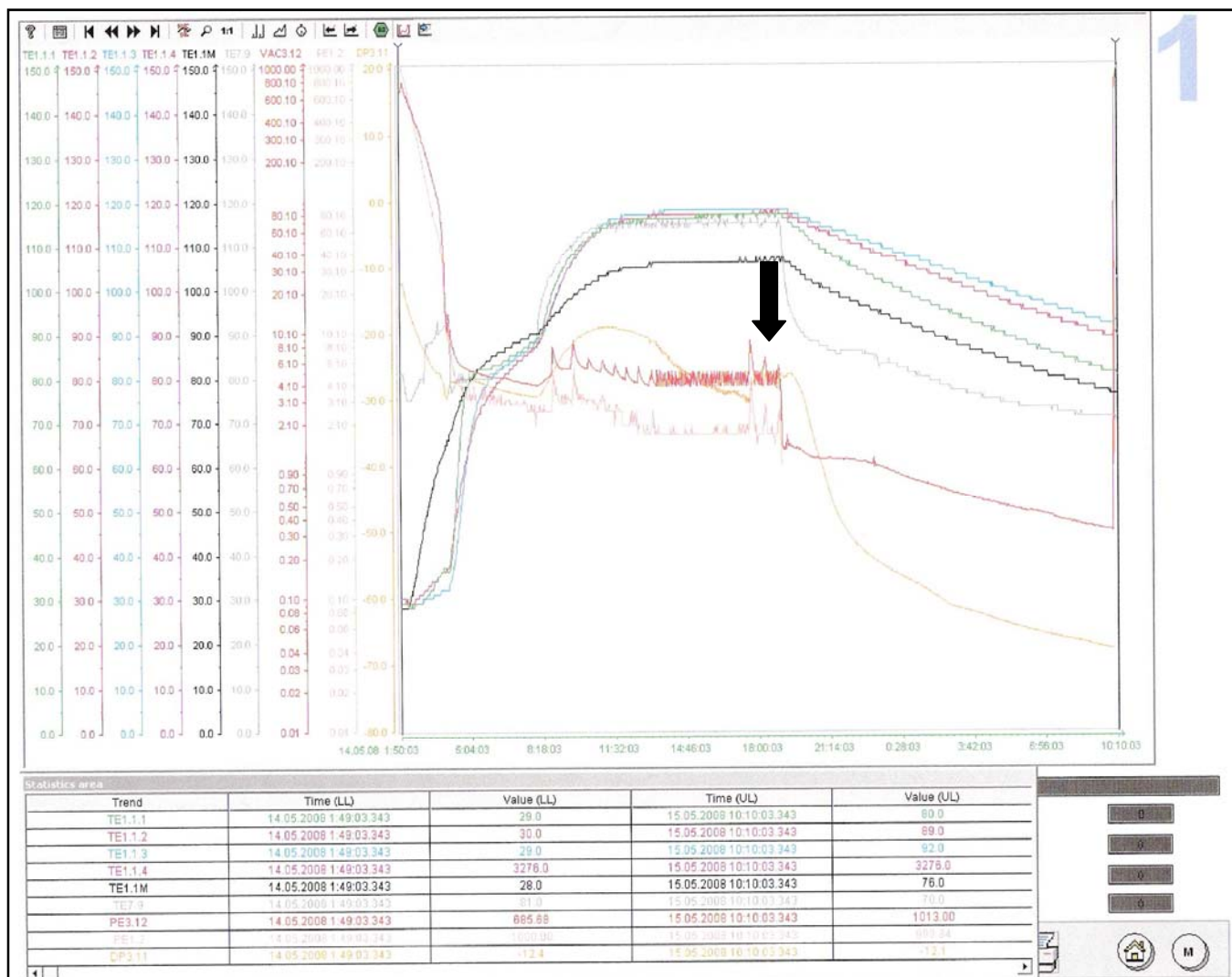


Figura 49 – Curvas retiradas do sistema de monitorização

Da análise da Figura 45 e da Figura 49 é possível verificar que o processo decorreu normalmente atingindo os valores esperados de temperaturas nas diferentes fases do processo *Standard*.

Em termos da absorção os valores estiveram próximos dos valores ideais pois foram consideravelmente melhores que os anteriores ensaios realizados há uns anos atrás. Isso deveu-se a um melhor acompanhamento do processo assim como o melhoramento nas instalações, pois o ensaio anterior não foi realizado nas actuais, mas sim em cubas que diferiam muito das que actualmente a área Core dispõem, que sendo mais recentes têm outras condições que as antigas não teriam.

Na Figura 49 está assinalado com uma seta o que terá sido um descuido do operário da manutenção da bomba de anel líquido, pois a bomba não pode ter muito líquido no depósito nem pouco. O que aconteceu neste caso foi que o operário descuidou-se e retirou demasiado líquido, o que se notou logo no serviço da bomba, mas sem que isso tenha qualquer relevância para os valores obtidos.

3.3.2. Ensaio 2: Processo de secagem *Termo-Spray*

3.3.2.1. Preparação dos provetes

Tal como no processo *Standard*, os provetes utilizados para o processo *Termo-Spray* também eram de dois tipos:

- 2,5mm de cartão duro;
- 5mm de cartão extra-duro.

Seguidamente, tal como no processo *Standard*, também foram pesados no laboratório de modo a obter-se 1000g de cada tipo de provetes. Posteriormente foram colocados no *vapour-phase* e mal foi concluído o processo foram levados para o laboratório para serem novamente pesados, Figura 50.



Figura 50 – Provetes saídos do *vapour-phase*

3.3.2.2. Preparação da bobina

A bobina seleccionada para o segundo ensaio foi uma Bobina AT / 50 MVA com o código E8010260C AT (Figura 51).

Nesta fase, foi medida, através do *Vanguard*, a resistência da bobina a seco. Foi também retirado papel, na quantidade de 4g, para mandar para o Labelec, de modo a medir o envelhecimento do papel.

Seguidamente a bobina foi colocada na autoclave, juntamente com os provetes e também foram feitas todas as ligações do *Vanguard* à bobina, assim como deste aos cabos existentes na cuba (Figura 52). No final do processo de secagem foram retirados os provetes e levados para o laboratório para serem pesados, tal como também foi retirado papel da bobina para também ser levado para o laboratório em Lisboa com a primeira amostra.



Figura 51 – Bobina AT / 50 MVA



Figura 52 – Ligações dos cabos para medição da resistência à bobina

Tal como no processo *Standard*, no novo processo também foram efectuadas medições diárias aos provetes de modo a controlar o poder de absorção de humidade. Também este processo tem uma duração de 3 meses, e visto que as pesagens continuam a ser efectuadas, neste trabalho só serão apresentadas até ao dia disponível. No entanto, é de realçar que os principais valores são os do primeiro mês pois é quando há mais absorção de humidade por parte do papel.

3.3.2.3. Resultados obtidos

Valor da resistência medida a seco: 1,459Ω.

Tabela 10 – Registo da resistência dos enrolamentos

Data	Horas (h)	Resistência (Ω)	Temp. Cobre (°C)	Temp. Spray (°C) TE-7.9	Temp. Cuba (°C) TE-1.1M	Sonda (°C) TE-1.1.2	Sonda (°C) TE-1.1.1	Sonda (°C) TE-1.1.3
14-06-2008	16.40	1,459	27,0	65	27	29	28	29
	17	1,462	27,5	65	34	37	35	34
	18	1,493	33,1	69	58	59	56	49
	19	1,546	42,6	69	69	70	67	61
	20	1,596	51,6	69	80	81	79	72
	21	1,637	59,0	68	89	90	89	80
	22	1,675	65,8	68	95	96	95	86
	23	1,708	71,7	67	100	101	100	92
15-06-2008	0	1,742	77,8	67	105	106	106	96
	1	1,773	83,4	67	107	110	110	126
	2	1,794	87,2	67	110	116	125	135
	3	1,825	92,7	66	113	118	144	144
	4	1,834	94,3	66	114	121	138	150
	5	1,856	98,3	66	115	128	138	150
	6	1,876	101,9	66	116	134	136	150
	7	1,877	102,1	66	114	124	124	150
	8	1,815	90,9	65	110	101	109	102
	9	1,814	90,7	65	107	100	108	100
	10	1,815	90,9	102	106	105	107	100
	11	1,857	98,5	112	103	112	108	105
	12	1,876	101,9	115	106	116	111	112
	13	1,896	105,5	116	108	118	113	115
	14	1,921	110,0	116	108	118	114	116
	15	1,927	111,0	116	108	118	115	116
	16	1,936	112,7	116	108	118	116	117
	17	1,942	113,7	117	108	116	116	117
	18	1,939	113,2	89	106	114	115	115
	19	1,936	112,7	84	101	110	115	115
	20	1,93	111,6	83	98	108	114	114
	21	1,923	110,3	82	96	106	113	113
	22	1,916	109,1	80	94	103	112	112

O cálculo do valor do cobre foi realizado através da seguinte fórmula:

$$T_2 = \frac{R_2 \times (235 + T_1)}{R_1} - 235$$

O valor 235 vem de:

$$R = \rho \times \frac{1}{S}$$

em que, S é o comprimento da secção.

$$R_\theta = R_{20}[1 + \alpha \times (\theta - 20)]$$

em que,

α é a variação ρ por $^{\circ}\text{C}$ (entre 1 e 20°C)

R_{20} é a resistividade a 20°C .

Os valores da Temperatura do Cobre, da Temperatura do *Spray*, da Temperatura da Cuba assim como da Temperatura das Sondas foram retirados do gráfico que o sistema de monitorização disponibiliza no final do processo (Figura 49).

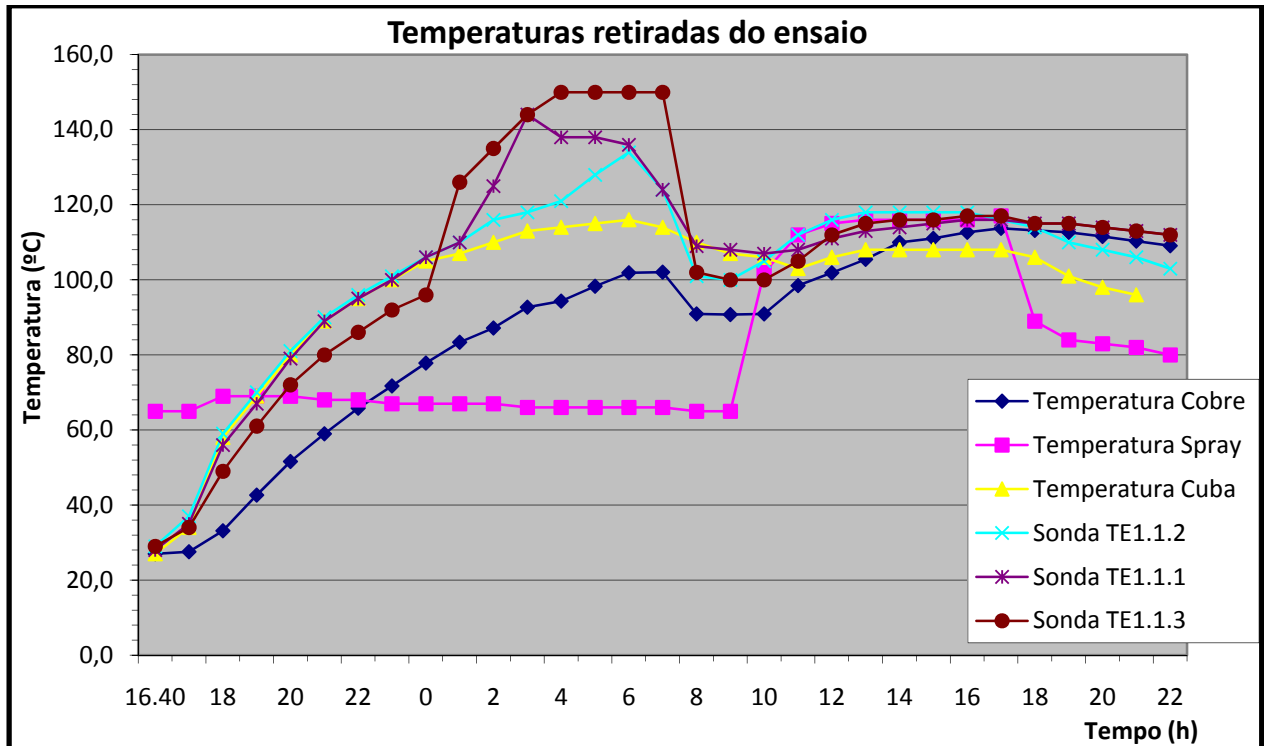


Figura 53 – Gráfico com valores retirados do ensaio

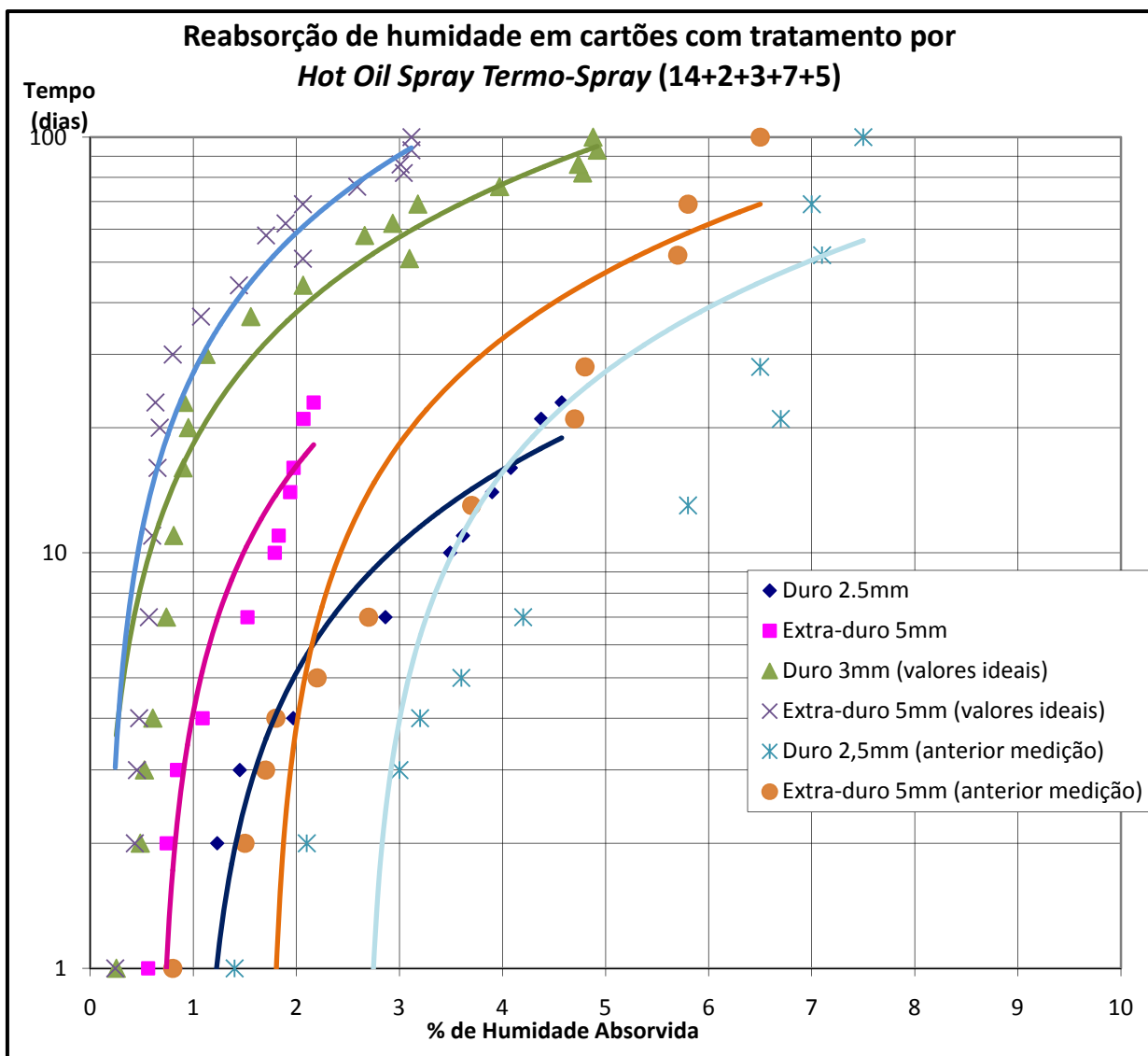


Figura 54 – Reabsorção da humidade em cartões com o processo *Termo-Spray*

		Provetes							
		Duro 2,5 mm				Extra-Duro 5 mm			
Massa (g) Inicial		1032,07				1073,65			
Massa (g) após Vapour-Phase		961,3				1019,81			
% H ₂ O Inicial		6,86				5,01			
Após o Spray de Óleo		Massa(g)	% H ₂ O	Massa Óleo (g)	% Óleo	Massa(g)	% H ₂ O	Massa Óleo (g)	% Óleo
Data	16-06-2008	1123,97	-	162,67	16,9	1128,33	-	108,52	10,6
Data	17-06-2008	1131,94	0,83	-		1134,05	0,56	-	
	1 dia								
Data	18-06-2008	1135,81	1,2	-		1135,9	0,74	-	
	2 dias								
Data	19-06-2008	1137,92	1,5	-		1136,92	0,8	-	
	3 dias								
Data	20-06-2008	1142,9	2,0	-		1139,45	1,1	-	
	4 dias								
Data	23-06-2008	1151,5	2,9	-		1143,88	1,5	-	
	7 dias								
Data	26-06-2008	1157,54	3,5	-		1146,59	1,8	-	
	10 dias								
Data	27-06-2008	1158,74	3,6	-		1146,97	1,8	-	
	11 dias								
Data	30-06-2008	1161,45	3,9	-		1148,11	1,9	-	
	14 dias								
Data	02-07-2008	1163,2	4,1	-		1148,45	2,0	-	
	16 dias								
Data	07-07-2008	1166,03	4,4	-		1149,43	2,1	-	
	21 dias								
Data	09-07-2008	1167,94	4,6	-		1150,43	2,2	-	
	23 dias								

Figura 55 – Medições realizadas aos provetes

Fórmulas utilizadas nos cálculos [5]:

$$\%H_2O_{\text{ Inicial}} = \frac{Massa_{\text{ Inicial}} - Massa_{\text{ após Vapour - Phase}}}{Massa_{\text{ Inicial}}} \times 100$$

$$Massa_{\text{ Óleo}} = Massa - Massa_{\text{ após Vapour - Phase}}$$

$$\%Óleo = \frac{Massa - Massa_{\text{ após Vapour - Phase}}}{Massa_{\text{ após Vapour - Phase}}} \times 100$$

$$\%H_2O = \frac{(Massa - Massa_{\text{ Óleo}}) - Massa_{\text{ após Vapour - Phase}}}{Massa_{\text{ após Vapour - Phase}}} \times 100$$

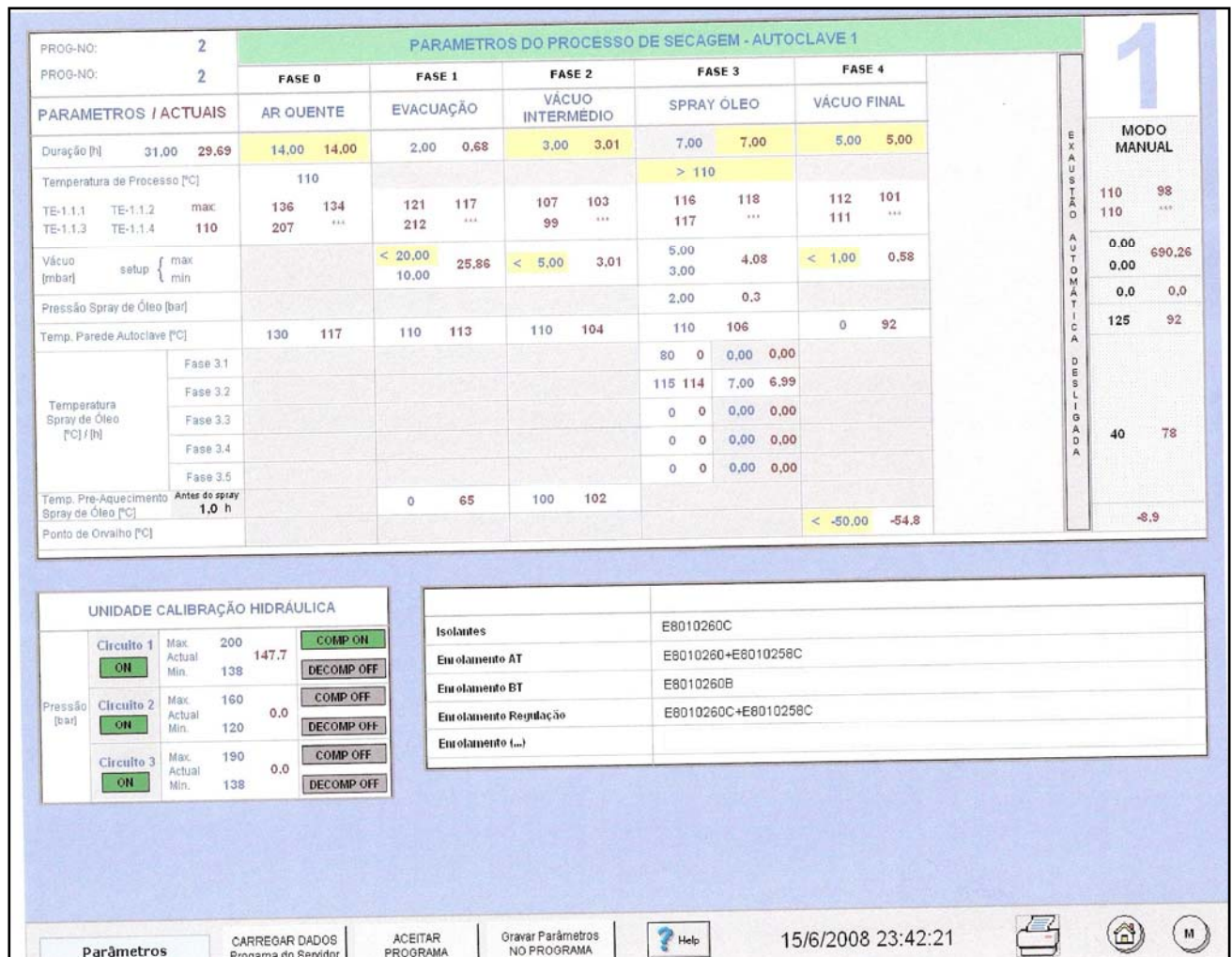


Figura 56 – Quadro retirado do sistema de monitorização com os parâmetros do processo de secagem *Standard*

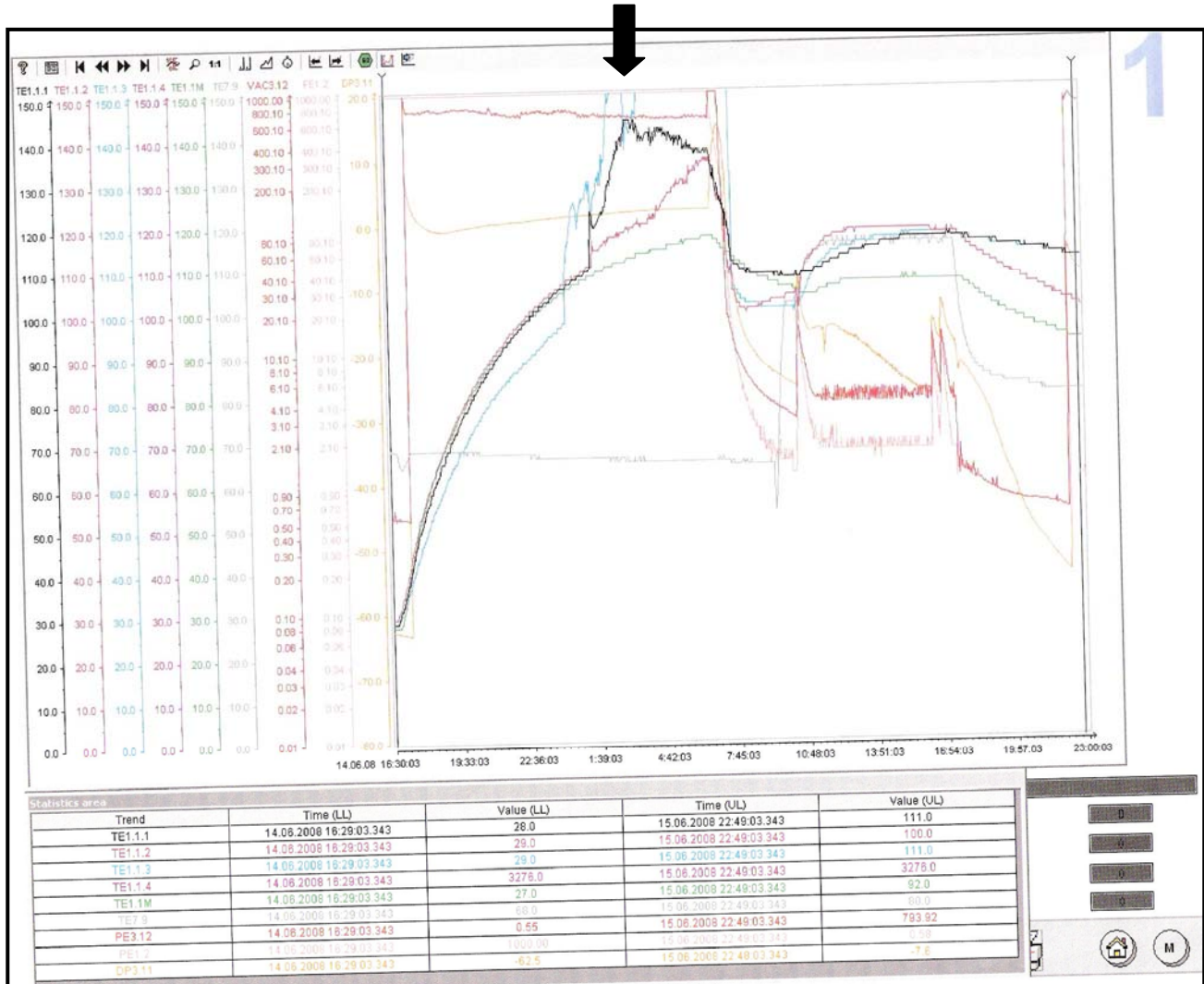


Figura 57 – Curvas retiradas do sistema de monitorização

Da análise das várias figuras, especialmente da Figura 57, é possível verificar que houve algumas anomalias no processo.

Devido ao facto de o processo ter 14 horas de ar quente as sondas, ao fim das 8 primeiras horas, começaram a revelar valores fora do normal pois não estavam acompanhar os valores das temperaturas do óleo e da cuba. Este factor deve-se ao tipo de sonda utilizado que não é o mais adequado para este tipo de utilização (14 horas de ar quente).

Para concluir melhor o que se passou, seria essencial fazer um novo ensaio. Também se reparou que estando a temperatura das paredes da cuba regulada para os 130°C a temperatura do cobre não conseguiu atingir os 110°C na fase do ar quente. No novo ensaio a temperatura das paredes da cuba deveriam ser reguladas para 140°C para se testar se o cobre conseguiria chegar aos 110°C.

Sendo que se verificou que no ar quente o aquecimento da cuba era muito lento, mais lento que o aquecimento por *spray* de óleo pois o termo-fluido que circula na instalação é banhado muito lentamente, nas seguintes fases o processo seguiu normalmente atingindo os valores esperados.

De notar que no final do processo o material vinha a escorrer de óleo o que não aconteceu no processo *Standard* (Figura 58 e Figura 59). Isto deveu-se ao facto de se ter feito

7 horas de *spray* de óleo enquanto só se realizaram 5 horas de vácuo final, o que não será um valor suficiente para os materiais virem sem óleo.



Figura 58 – Material com óleo acabado de sair do processo *Termo-Spray*



Figura 59 – Bobina no final do processo de *Termo-Spray*

3.4. Discussão de resultados

Uma vez é que a medição do processo demora três meses não se pode tirar grandes ilações pois os processos ainda só têm aproximadamente um mês de medições. Contudo verificou-se que as curvas de absorção de humidade estão relativamente perto uma das outras, porém ainda um pouco afastadas das curvas ideais.

Com os valores que foram determinados no Labelec, através da medição do envelhecimento às amostras de papel retirado dos transformadores, antes e depois dos processos, verificou-se, mesmo não podendo revelar os resultados pois são confidenciais para a empresa, que o envelhecimento no caso do *Termo-Spray* era maior que no caso do processo *Standard*. Mesmo assim, e para tirar todas as dúvidas em relação ao novo processo era essencial fazer novos ensaios para se retirar o máximo de informação possível deste processo, pois pode vir a ser útil num futuro próximo. A utilização de ar quente no processo de secagem de componentes de transformadores pode vir a revelar-se essencial no futuro das secagens, por isso quantos mais ensaios se fizerem para se tirar todo o tipo de *know-how*, melhor.

Uma vez que se verificou que no final do processo *Termo-Spray* havia muito óleo no material, provavelmente aumentar o número de horas de vácuo final também não seria uma má opção, devido ao facto de se poder trabalhar melhor na zona da calibragem.

Quanto à instalação do *Hot Oil Spray*, sendo este processo um dos mais adequados para este fim, e tendo esta instalação uma única bomba de anel líquido para dois autoclaves, também não seria uma ideia descabida colocar uma outra unidade de vácuo. Assim sendo, já não havia a necessidade de quando uma cuba está a ser utilizada não ter que esperar que a primeira acabe ou vice-versa pois haveria dois sistemas autónomos de vácuo.

4. Prensa de excêntrico com embraiagem mecânica de ataque directo

4.1. Objectivo

No decorrer do estágio, para além do objectivo principal, o ensaio no processo de secagem *Hot Oil Spray*, também me foi incumbido assimilar o correcto funcionamento de uma prensa de excêntrico com embraiagem de ataque directo (Figura 60), de modo a programá-la e ser tipo um formador para os operários da produção que iriam trabalhar com ela. A máquina está na área dos isolantes, e a sua função é a de fazer calços (Figura 61) que serão posteriormente utilizados nas bobinas dos transformadores.

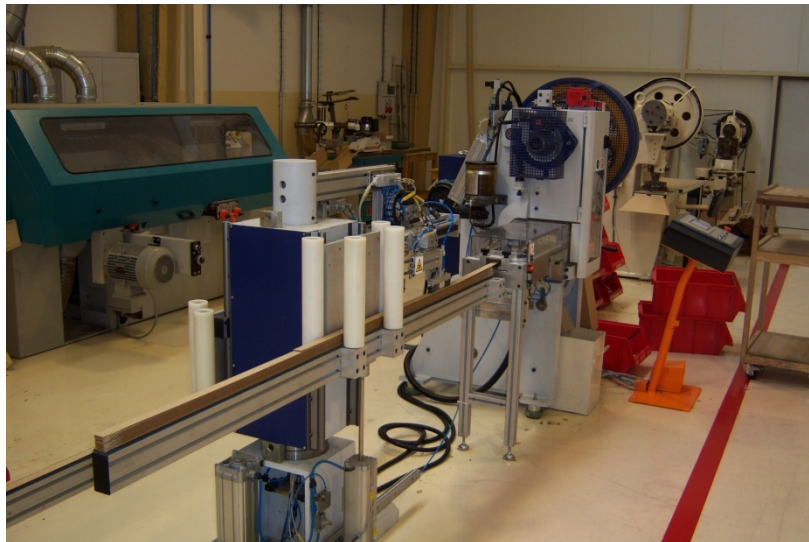


Figura 60 – Prensa de excêntrico com embraiagem de ataque rápido

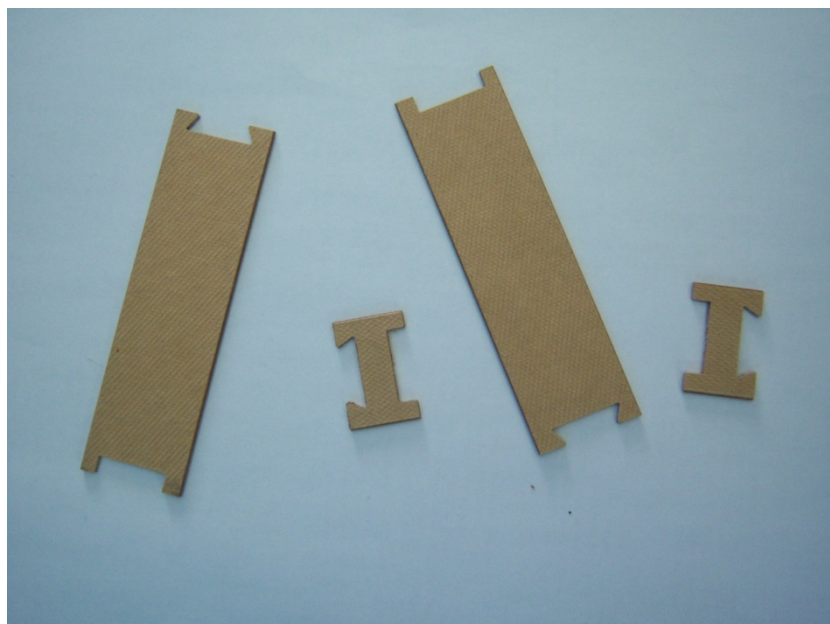


Figura 61 – Calços de 19mm e de 104mm

4.2. Características gerais e dimensões gerais

Tabela 11 – Características gerais [15]

Força nominal	kN	200
Ponto de força	°	30
Distância entre montantes	mm	180
Superfície da mesa	mmxmm	450x300
Furo da mesa	mm	90
Superfície da corredeira	mmxmm	158x115
Furo da corredeira para montagem da ferramenta	mm	40
Cursos	mm	10-60
Distância da mesa à corredeira no PMI, no curso máximo e a afinação deste em cima	mm	150
Regulação do carro	mm	25
Distância da mesa ao solo	mm	730
Cadência em contínuo	golpes/mnin	135
Energia total do volante	kgxm	64,5
Energia disponível em contínuo	kgxm	12,3
Altura total da prensa	mm	1680
Peso total aproximado da prensa	kg	835
Pressão de alimentação pneumática	bar	6
Secção da tubagem pneumática de alimentação	G	¼"
Potência / velocidade do motor principal	kW/rpm	1,5/1000
Tensão / frequência de alimentação	V/Hz (AC)	400/50
Secção do cabo de alimentação	mm ²	2,5
Potência do variador de velocidade	kW	2,2
Poder de corte do dispositivo de protecção	kA	100
Consumo eléctrico	A	4,5

4.3. Atravancamento

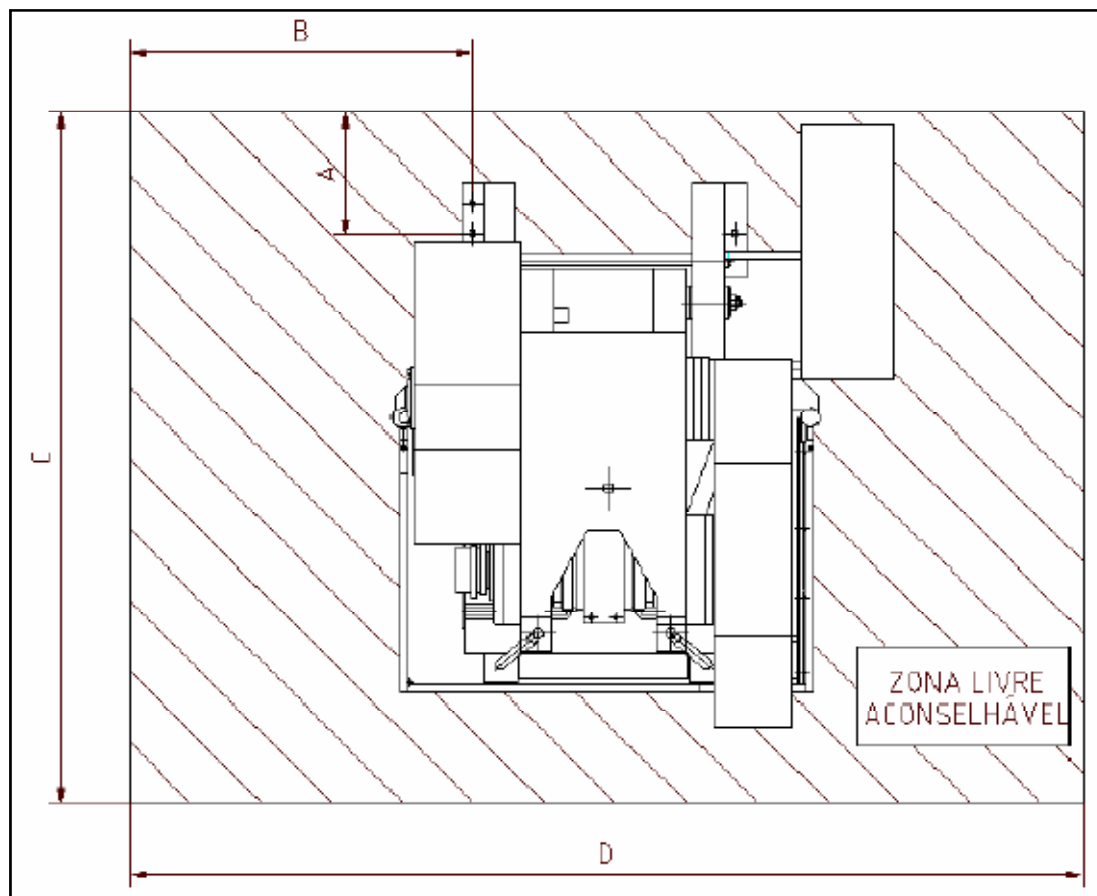


Figura 62 – Atravancamentos [15]

Dimensões em mm da zona livre de trabalho aconselhável excluindo os dispositivos opcionais associados à máquina [15]:

A: 500
B: 700

C: 1500
D: 2300

4.4. Dimensões gerais e das fundações

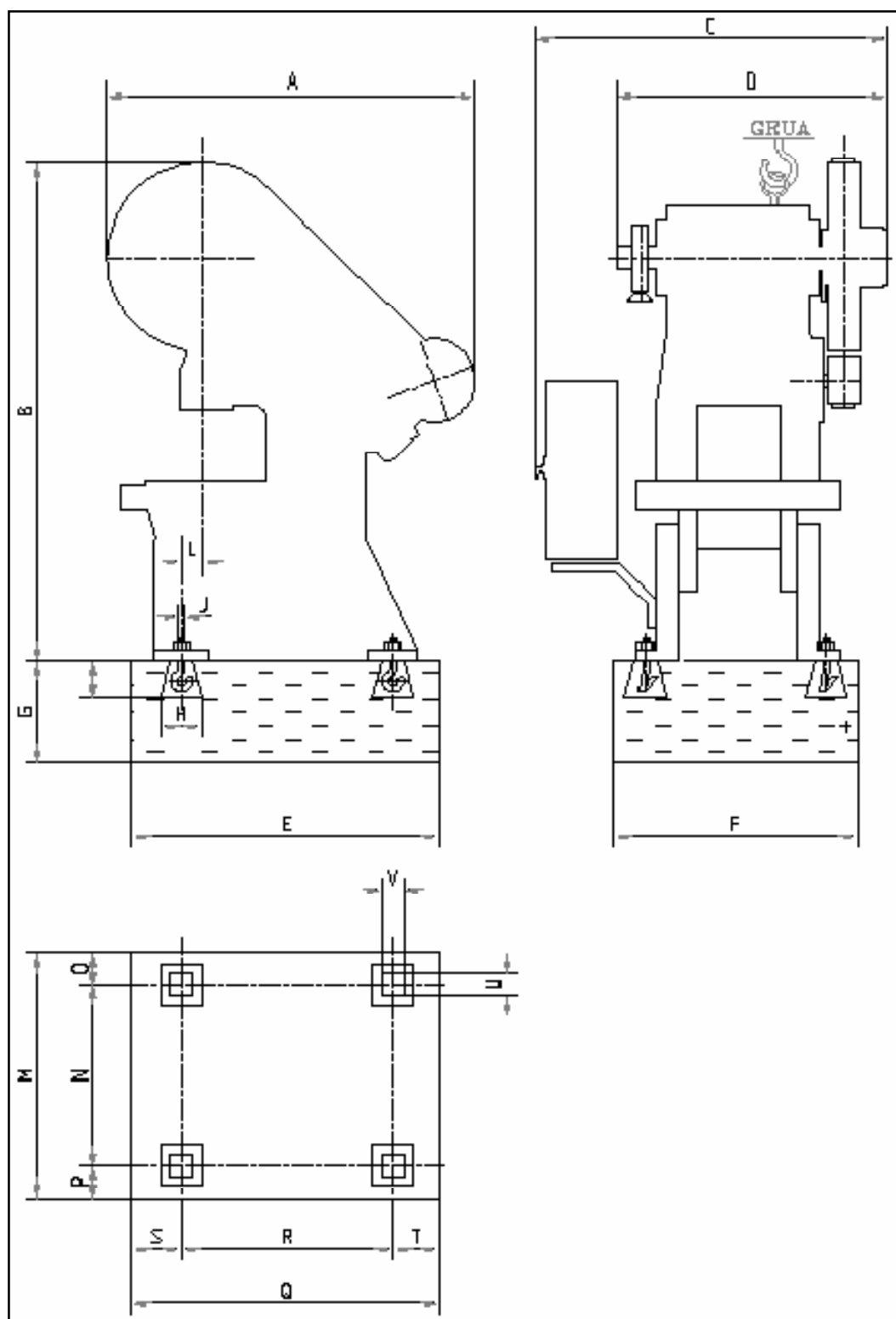


Figura 63 – Dimensões gerais e das fundações da prensa [15]

Dimensões gerais e das fundações em mm [15]:

A:	1120	H:	150	P:	200
B:	1700	I:	150	Q:	1050
*C:	1010	J:	M14	R:	510
D:	760	L:	11	S:	150
E:	1050	M:	910	T:	150
F:	910	N:	510	U:	100
G:	300	O:	200	V:	100

* Valores com variações significativas, de acordo com o pedido do utilizador

4.5. Condições ambientais

No funcionamento deverão ser consideradas as seguintes restrições [15]:

- Variações bruscas de temperatura; a temperatura máxima de funcionamento não deve exceder os 40°C.
- Ambientes corrosivos ou explosivos;
- Entrada de poeiras, partículas metálicas, água, óleo ou produtos químicos para o interior do armário eléctrico;
- Entrada de água, óleo ou outros produtos para o interior do conjunto embraiagem/freio;
- Montagens junto a aparelhos próximos emissores de ruído electromagnético que não possuam filtros de protecção

4.6. Verificações

Antes de iniciar o trabalho, é necessário verificar [15]:

- Todas as condutas secundárias do sistema de lubrificação;
- A tensão da correia;
- Se os dispositivos de protecção e respectivos componentes se encontram em perfeito estado de funcionamento;
- Se todos os parafusos se encontram bem apertados;
- Se o lubrificante chega a todos os pontos;
- Se todos os mecanismos funcionam regularmente;
- Se as cames se encontram bem apertadas;
- Se a unidade de fins de curso se encontra segura e os roletos dos seus êmbolos em bom estado e lubrificados.

4.7. Comandos, protecção e funcionamento ou iniciação

4.7.1. Placas sinaléticas

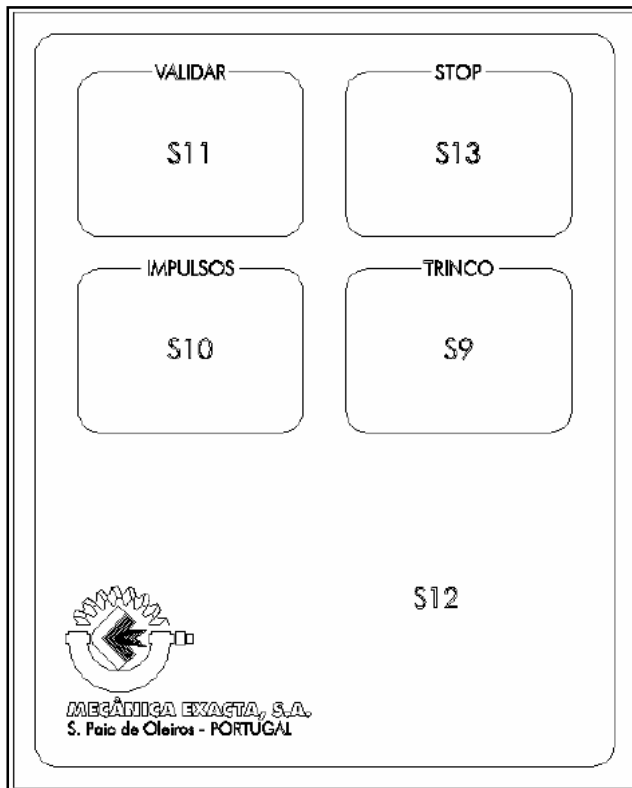


Figura 64 – Placa sinalética dos comandos gerais [15]

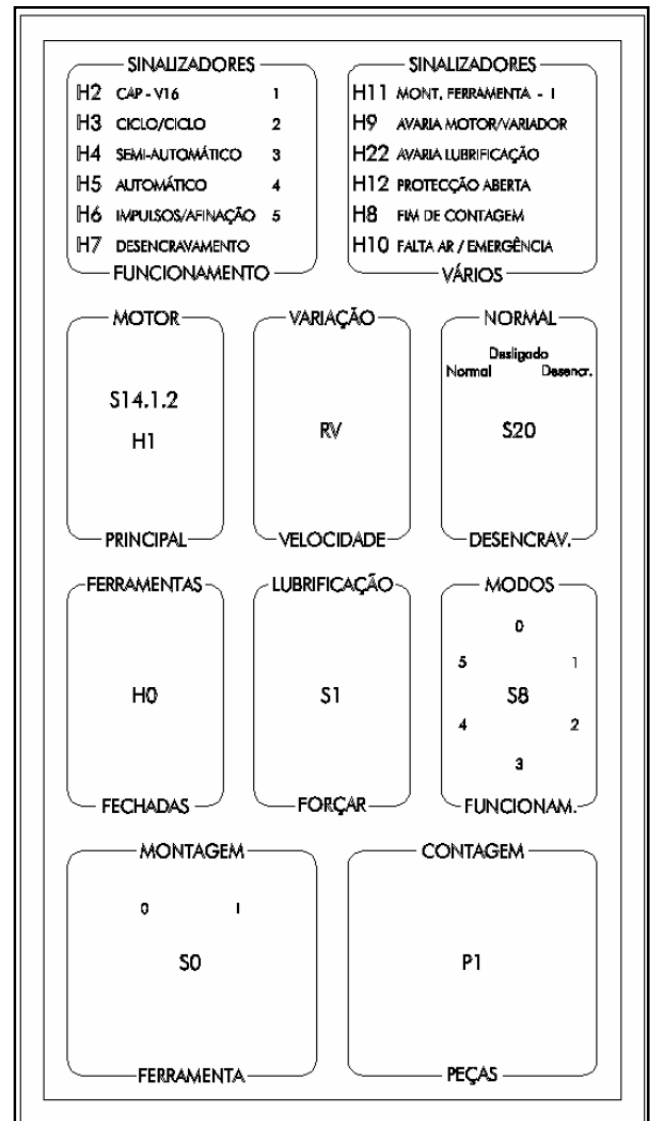


Figura 65 – Placa sinalética dos comandos gerais [15]

4.7.2. Modos de funcionamento

Quando a máquina é fornecida para trabalhar exclusivamente com alimentação e extracção automática, esta vai fornecida com uma porta de movimentação manual. Se é fornecida para trabalhar apenas com ferramentas fechadas, apenas os órgãos móveis da máquina vão protegidos [15].

Em qualquer modo de funcionamento, excepto em acerto de ferramenta “impulsos normais sem motor”, devem ser fechadas todas as protecções [15].

Sempre que se abre a porta ou a vedação, para prosseguir o trabalho com a máquina, é necessário colocá-las nos respectivos lugares e validar através de “S11”. A abertura da porta

ou da protecção dos órgãos móveis é feita através do botão do trinco “S9 ” e nunca através da chave do próprio trinco. Esta apenas deve ser utilizada para efeitos de manutenção e deverão ser tomadas as devidas precauções na sua abertura nomeadamente a confirmação de que a máquina está desconectada da corrente eléctrica e o volante está parado [15].

A porta e/ou a protecção dos órgãos móveis só podem ser abertas quando o carro estiver parado e no PMS¹⁷, excepto em acerto de ferramentas [15]. No modo de acerto de ferramentas só é permitido abrir a porta ou a protecção dos órgãos móveis com o motor parado.

A prensa tem os seguintes modos de funcionamento [15]:

- CAP “comando por pedal”;
- Pedal ciclo a ciclo;
- Pedal contínuo de acção continuada “semi-automático”;
- Automático “pedal contínuo de acção inicial”;
- Impulsos / afinação da ferramenta;
- Desencravamento.

O modo de funcionamento que se utiliza para a produção de calços é o CAP “comando por pedal”. Seguidamente é apresentada uma breve descrição, pois num dos capítulos seguintes será apresentado com mais pormenor.

4.7.2.1. CAP “comando por pedal”

Este modo de funcionamento é obtido com o comutador “S8” de modos de funcionamento na posição 1 e o comutador "S20" de sentido de rotação do motor em modo normal.

A iniciação do ciclo é sempre feita com o pedal. O fim dos ciclos automáticos deve surgir apenas por actuação do botão de stop automático “S13”.

Para que a prensa possa funcionar neste modo é necessário adquirir o dispositivo CAP (controlo de alimentador-prensa) [15].

4.8. Regulações e fixação da ferramenta

4.8.1. Regulações

As regulações da prensa têm como finalidade adaptar a máquina da melhor forma possível ao processo produtivo, no qual tem extrema importância a montagem da ferramenta e a extracção de peças. Antes de proceder a este tipo de operações, o utilizador deverá certificar-se, com segurança, que estão cumpridas todas as medidas necessárias à realização da operação em causa [15].

Os valores indicados para os cursos têm uma tolerância de ± 2 mm [15].

4.8.2. Regulação de curso

A máquina dispõe de um conjunto de cursos.

Para se proceder à mudança de curso é necessário [15]:

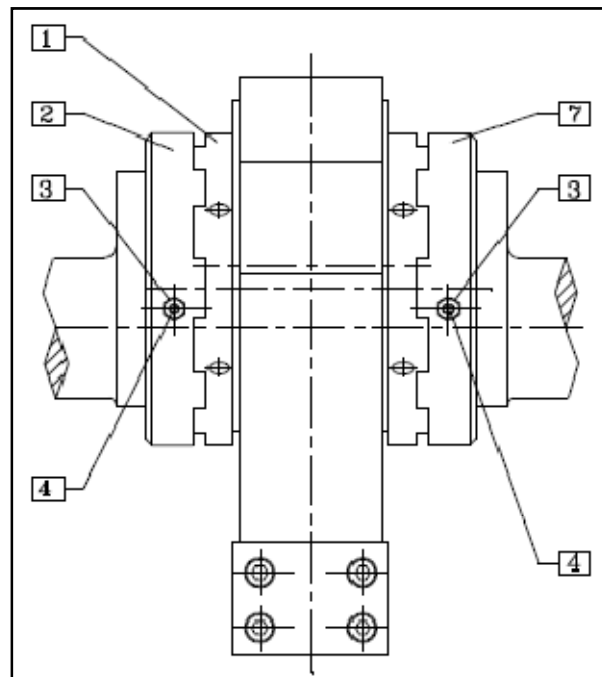


Figura 66 – Mudança de curso

- Assegurar que não existe nenhuma ferramenta montada na máquina;
- Colocar o comutador de “Montagem da Ferramenta” “S0” na posição de mudança “permitida (I)”;
- Desapertar as porcas (3) e os parafusos (4);
- Deslocar lateralmente as peças (2) e (7) utilizando para o efeito a ferramenta especial fornecida com a máquina;
- Rodar manualmente o excêntrico (1) para o curso desejado, introduzindo a barra de regulação nos furos existentes para esse efeito;
- Voltar a colocar em posição as peças (2) e (7);
- Reapertar os parafusos (4) e as porcas (3).

4.8.3. Regulações da corrediça "carro"

Para um determinado curso, a posição da corrediça é regulável para permitir ferramentas de alturas diferentes. Os valores da Figura 67 e da Tabela 12 devem ser respeitados para que a altura da ferramenta na posição fechada não exceda o espaço mínimo disponível para o curso em causa [15].

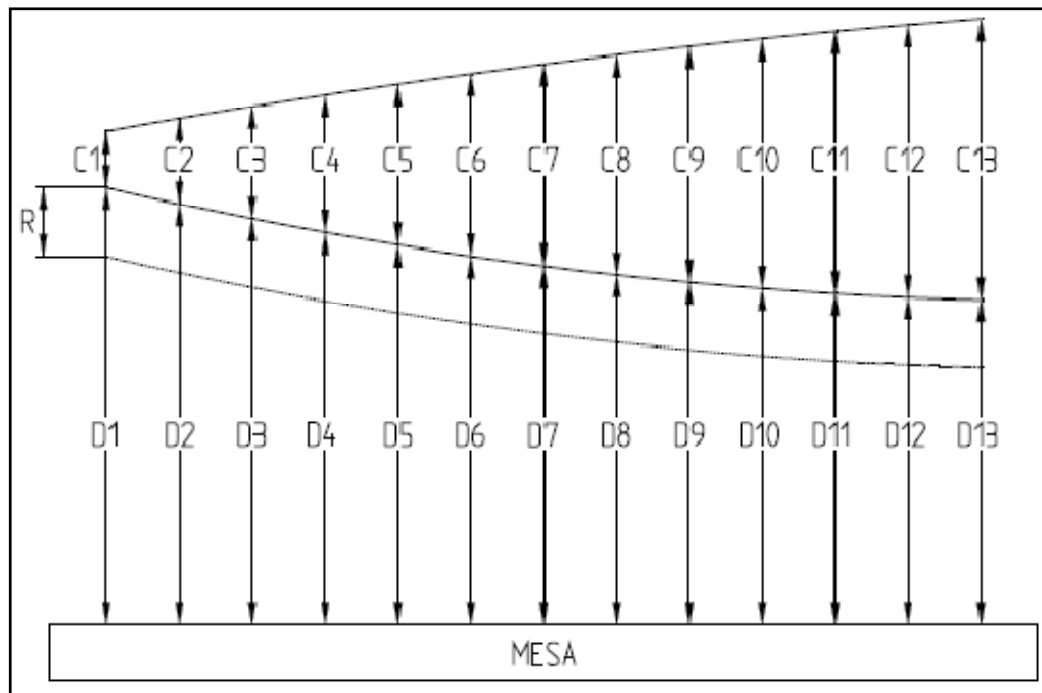


Figura 67 – Regulação do curso e do carro [15]

C1-C13 – Cursos teóricos da máquina (mm)

D1- D13 – Distâncias entre a corredeira no PMI¹⁸ e a regulação do carro em cima (mm)

R – Regulação do carro (mm)

Tabela 12 – Dimensões para a regulação do curso e do carro [15]

Prensa	Dimensões													R
	C1 D1	C2 D2	C3 D3	C4 D4	C5 D5	C6 D6	C7 D7	C8 D8	C9 D9	C10 D10	C11 D11	C12 D12	C13 D13	
CP010	6 169,5	15 165	25 160	35 154,9	45 150	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	25
CP020	10 180	18 175,9	31 169,4	43 163,5	52 158,9	58 156	60 155	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	25
CP030	15 180	18 178,5	25 175,2	32 171,3	40 167,5	47 163,9	53 160,8	58 158,3	62 156,5	64 155,4	65 155	-- --	-- --	25
CP045	20 230	24 227,5	34 223,2	45 217,7	55 212,3	65 207,4	74 203,1	81 199,6	86 197,1	89 195,5	90 195	-- --	-- --	40
CP065	20 240	25 237,5	36 231,9	49 225,6	61 219,5	72 213,9	82 209,1	90 205,2	95 202,3	99 200,6	100 200	-- --	-- --	40
PL045	20 230	24 227,5	34 223,2	45 217,7	55 212,3	65 207,4	74 203,1	81 199,6	86 197,1	89 195,5	90 195	-- --	-- --	40
PL065	20 240	25 237,5	36 231,9	49 225,6	61 219,5	72 213,9	82 209,1	90 205,2	95 202,3	99 200,6	100 200	-- --	-- --	40
PL090	20 340	25 337,5	37 331,7	50 315,2	62 318,8	75 314,6	86 307	96 302	101 297,2	111 294,4	116 292	119 290,5	120 290	50
PL120	20 365	27 361,5	41 354,5	57 346,7	72 338,9	87 331,7	100 325	112 319,1	122 314,2	130 310	135 307,3	139 305,6	140 305	50
PL150	20 365	28 361,1	43 353,3	60 344,8	77 336,5	93 328,7	107 321,5	120 315,2	130 309,9	139 305,6	145 302,5	149 300,6	150 300	50

Para se proceder à regulação do carro é necessário [15]:

- Colocar a corredeira na posição correspondente ao PMI;

- Comutar o selector Montagem da Ferramenta “S0” para a posição de mudança “permitida (I)”. Desapertar os parafusos (1) e rodar a porca (2) através do roquete (4) de modo a subir a corrediça para a posição mais elevada;
- Aliviar as porcas (5) de fixação do nariz da ferramenta;
- Colocar a ferramenta em posição aproximada;
- Rodar o parafuso (2) de forma a aproximar a corrediça do punção da ferramenta. Nesta fase deve ser previsto espaço suficiente para que a máquina não encrave ao passar o PMI. Fixar os parafusos (1);
- Fixar as porcas (5) de fixação do nariz da ferramenta;
- Seguir o processo indicado nos modos de funcionamento por impulsos/afinação;
- Verificar a folga existente na ferramenta. Caso haja necessidade de reajuste, colocar o selector de Montagem da Ferramenta para mudança “permitida (I)”. Desapertar os parafusos (1) e proceder ao ajuste do parafuso (2). O ajuste deve ser feito com cuidado (limitar o ajuste a valores pequenos). Reapertar os parafusos (1) e repetir a operação anterior;
- Uma vez concluídas estas operações, colocar o selector de Montagem da Ferramenta “S0” para mudança “impedida (O)”;

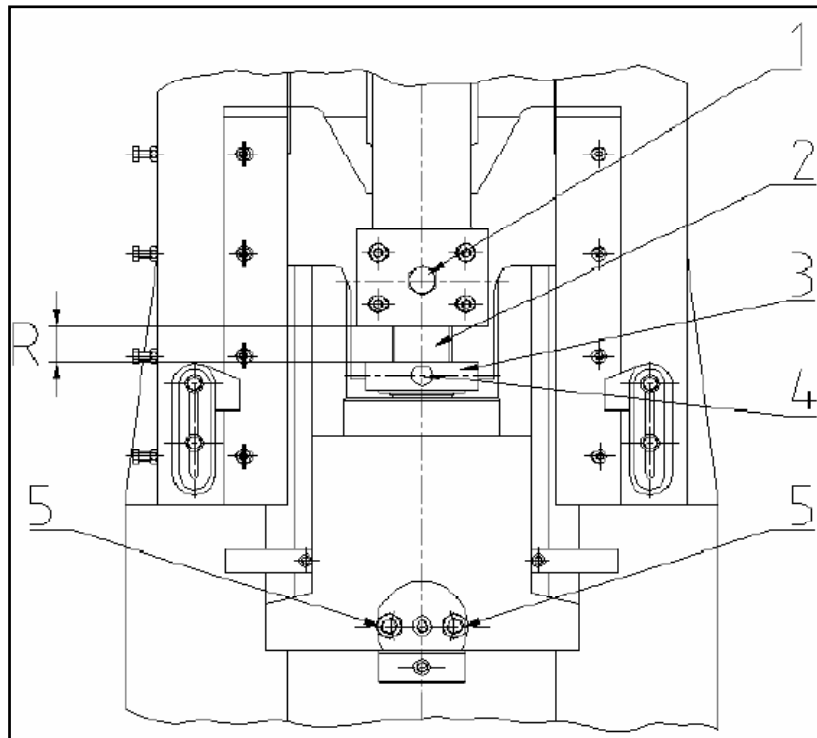


Figura 68 – Regulação do carro [15]

4.8.4. Embraiagem mecânica e freio (desencravamento)

4.8.4.1. Embraiagem mecânica

A máquina é equipada com uma embraiagem mecânica (embaíagem de linguete) accionada por intermédio de um cilindro pneumático e é controlado por duas válvulas monoestáveis designadas por Y1 e Y2 no circuito eléctrico [15]. O circuito pneumático é redundante e monitorizado pneumaticamente [15].

A embraiagem é uma peça sujeita a esforços de fadiga e desgaste significativo, sendo por isso recomendada a substituição periódica de vários dos seus componentes.

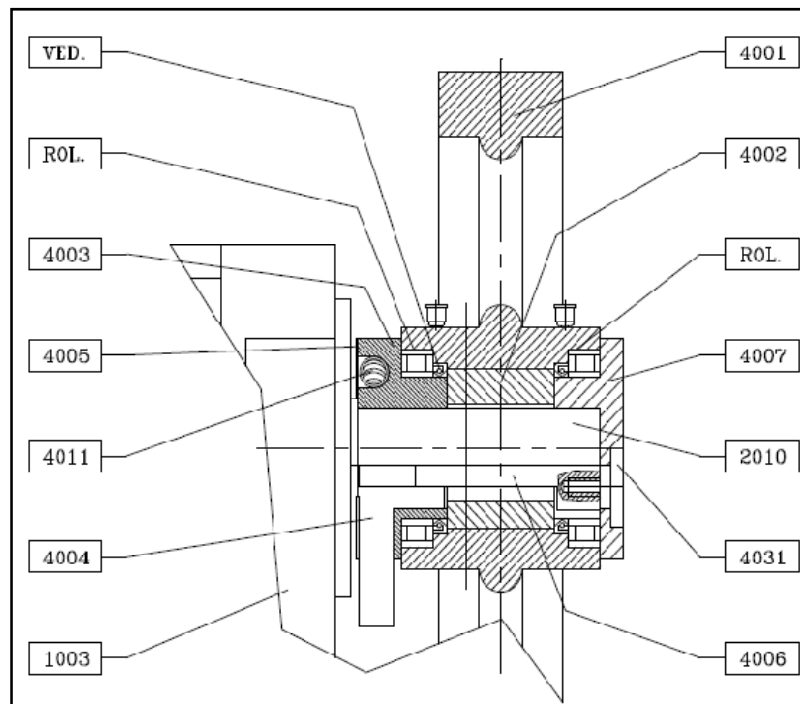


Figura 69 – Embraiagem mecânica

4.8.4.2. Desencravamento

Por vezes, o equipamento fica encravado por efeito da prisão provocada pelo material na ferramenta. Para se proceder ao seu desencravamento, proceder do seguinte modo (Figura 69) [15]:

- Retirar a peça 4031;
- Inserir um parafuso M12 no furo da chaveta 4006;
- Puxar a chaveta 45mm para fora do seu alojamento e rodá-la um quarto de volta no sentido do movimento dos ponteiros do relógio;
- Empurrar a chaveta cerca de 30 mm para dentro até sentir esta a bater;
- Rodar o volante à mão, segurando bem a chaveta com a outra mão, no sentido movimento dos ponteiros do relógio até sentir o volante encostado;
- Rodar o volante em sentido contrário à mão menos de 1/8 de volta;
- Fechar todas as protecções;
- Seleccionar o comutador de sentido de rotação “S20” para desencravamento;
- Seleccionar o comutador de modos de funcionamento “S8” para impulsos;
- Segurando bem a chaveta com a mão premir o botão de impulsos.
- Logo que sinta a máquina desencravada retirar imediatamente a mão do botão de impulsos;
- Se não conseguir desencravar a máquina por este processo, não insista e contacte com o fornecedor;
- Após desencravada a máquina, montar as peças na sua posição inicial.

A incorrecta afinação do freio da máquina provoca esforços suplementares sobre os componentes da embraiagem, o que pode levar à rotura prematura de um deles. O freio deve ser mantido afinado de acordo com o seguinte capítulo [15].

4.8.5. Freio

A prensa vem equipada com um freio de maxilas, que actua através de um excêntrico, cuja afinação é importante para o correcto funcionamento do equipamento [15].

Desta afinação resulta a maior ou menor sollicitação da embraiagem da máquina.

Considera-se que o freio se encontra devidamente afinado quando, com a máquina parada no ponto morto superior, o valor da cota " X " é igual a 5 mm (Figura 70) [15].

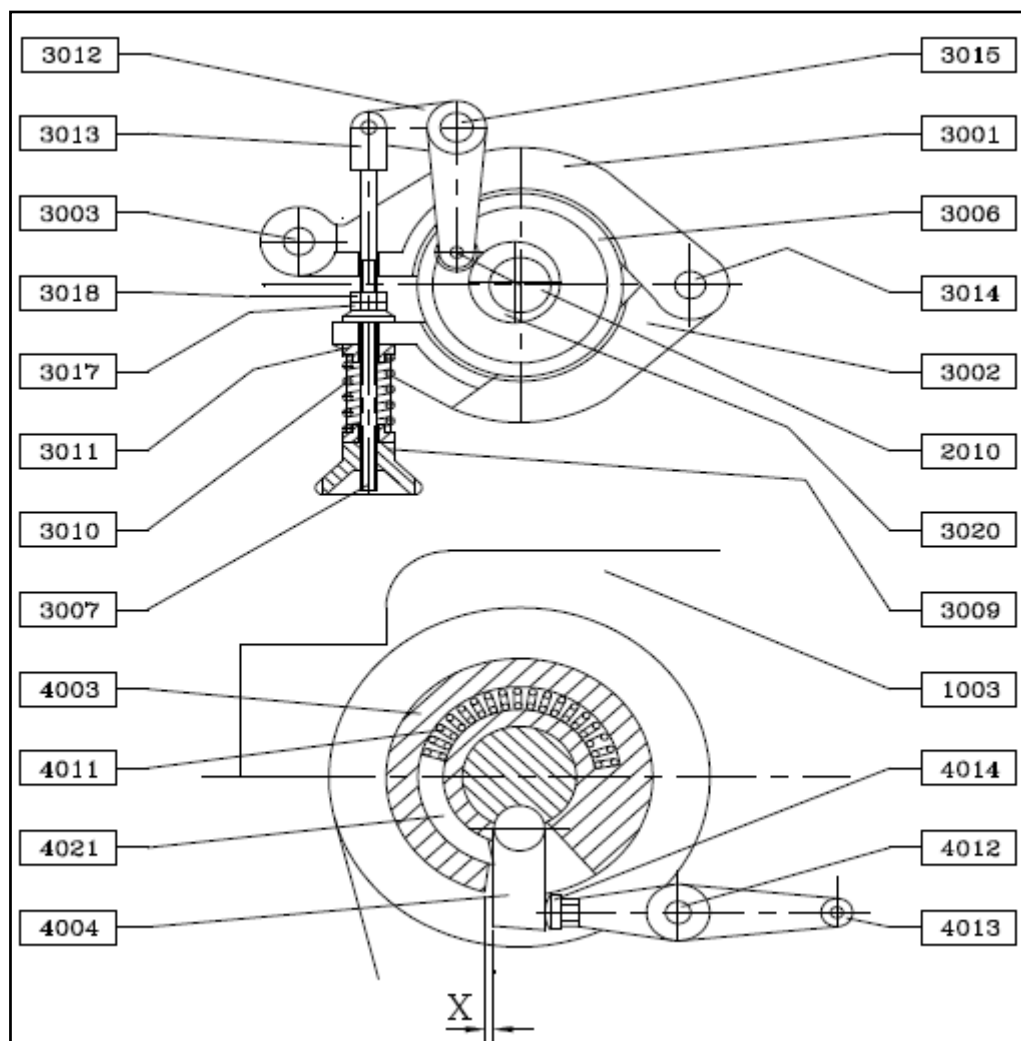


Figura 70 - Freio

Existem dois tipos de afinação; a afinação geral e a pequena afinação. Deve fazer-se uma afinação geral quando as guarnições de ferôdo tiverem 3mm de espessura (as guarnições de ferôdo novas têm 6 mm), ou sempre que a pequena afinação não seja suficiente para o bom funcionamento do freio [15]. Deve-se fazer uma pequena afinação sempre que o valor da cota " X " seja inferior a 5 mm.

O valor da cota " X " nunca deverá ser inferior a 2 mm.

Quando a espessura da guarnição do freio atingir o valor 1,5 mm deve-se proceder à sua substituição [15].

Para fazer uma afinação geral deve-se proceder do seguinte modo (Figura 70 e Figura 71):

- a) Posicionar a cambota de modo a que o excêntrico 3020 fique com a zona 1 encostada ao rolamento da alavanca 3012. Esta zona corresponde ao ponto morto superior (PMS) da corrediça.
- b) Desapertar a contra-porca 3018 e de seguida desapertar (1/4 de volta) a porca 3017.
- c) Rodar a cambota de modo a que o excêntrico 3020 fique com a zona 2 encostada ao rolamento da alavanca 3012. Esta zona corresponde ao movimento de descida da corrediça.
- d) Ajustar a mola 3010 através do aperto do manípulo 3009, de maneira a que a maxila 3002 fique bem firme, efectuando a travagem conveniente do movimento da corrediça, mas não em demasia.
- e) Voltar a rodar a cambota até que o excêntrico 3020 fique com a zona 3 encostada ao rolamento. Esta zona corresponde ao movimento de subida da corrediça. Nesta posição, a maxila 3002 deve estar solta e com uma folga entre 0.05 e 0.1 mm em relação a polia 3006.
- f) Encostar simplesmente, sem apertar, a porca 3017 à maxila 3002, de seguida apertar a contra-porca 3018 de encontro à porca 3017.
- g) Confirmar a afinação, dando uma ou duas voltas completas à cambota.

O comportamento da máquina nas diferentes zonas deve ser o seguinte:

Zona 1 – Bem travado - Ponto morto superior (PMS) da corrediça.

Zona 2 – Travado - movimento de descida da corrediça.

Zona 3 – Solto - movimento de subida da corrediça.

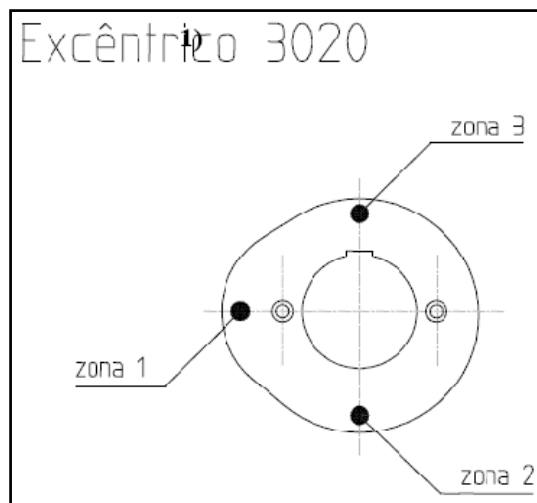


Figura 71 - Excêntrico

Para fazer uma pequena afinação deve-se proceder do seguinte modo [15]:

- a) Com a cambota de modo a que o excêntrico 3020 fique com a zona 1 encostada ao rolamento da alavanca 3012. Esta zona corresponde ao ponto morto superior (PMS) da corrediça.
- b) Aliviar, em simultâneo, as porcas 3018 e 3017, para expandir a mola 3010 de maneira a que a maxila 3002 fique bem firme, efectuando a travagem conveniente do movimento da corrediça. No caso da mola 3010 não ter força suficiente, apertar, ligeiramente, o manípulo 3009, mas não demasiado.
- c) Confirmar a afinação, dando uma ou duas voltas completas à cambota.

Devido a tratar-se de um órgão sujeito a desgaste, a afinação do freio deve ser verificada diariamente.

4.9. CAP

4.9.1. Introdução

Os dispositivos CAP “controlo alimentador versus prensa” são dispositivos de controlo de alimentadores associados a prensas mecânicas com embraiagem-freio "de revolução parcial" ou com embraiagem mecânica, chaveta e linguete, também designada de "revolução total" [15].

Estes dispositivos destinam-se à automatização dos processos, aumentando a produtividade e a segurança mecânica nos equipamentos, não constituindo por si só sistemas de segurança de pessoas com intervenção directa ou indirecta no processo produtivo. Neste sentido o operador deverá utilizar protecções complementares como sejam dispositivos de protecção electrosensível, ferramentas fechadas, protecções mecânicas ou qualquer outro tipo de protecção de acordo com a directiva máquinas [15].

4.9.2. Descrição do funcionamento da unidade

A unidade de alimentação automática é constituída por um sistema que armazena tiras de cartão e as coloca num alimentador electrónico com movimento alternado para alimentar a prensa.

4.9.2.1. 18.3.1 Menu principal

Permite o acesso a todos os submenus de programação e / ou visualização do sistema:

- Configuração do alimentador;
- Entradas / saídas do PLC;
- Funcionamento manual;
- Avarias Anomalias;
- Programação do sistema;

- Lubrificação;
- Programação da contagem de peças;
- Gestor.

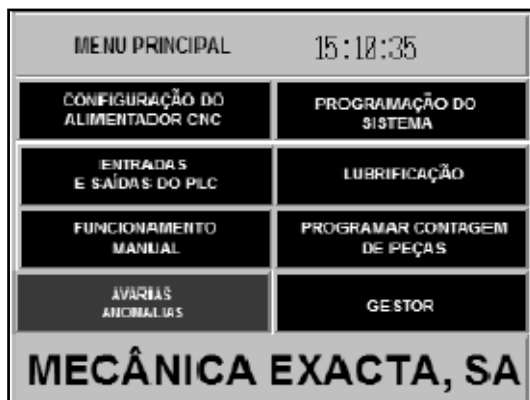


Figura 72 – Menu Principal

4.9.2.2. Configuração do alimentador

Este menu permite o acesso, com palavra-chave, a:

- Velocidade, em %, do movimento do alimentador em teste;
- Aceleração e desaceleração, em %, do movimento do alimentador, em teste;
- Aceleração e desaceleração, em %, do movimento do alimentador, em automático.



Figura 73 – Configuração do alimentador

4.9.2.3. Entradas e saídas do PLC

Este menu permite o acesso, para efeitos de manutenção, à visualizar as entradas e saídas activadas.



Figura 74 – Saídas do Autômato Omron

4.9.2.4. Funcionamento manual

Este menu permite:

- Comandar o servo em modo teste ou modo manual;
- Introduzir o valor da cota a percorrer;
- Seleccionar sem busca de origem:
Neste caso ao premir a tecla de TESTE/ARRANQUE o alimentador vai fazer em primeiro lugar a busca de origem e pressionando a segunda vez a mesma tecla, este posiciona-se de acordo com a cota estabelecida, com a velocidade e aceleração estabelecidas na configuração.



Figura 75 – Teste / Busca de origem

Ao premir a tecla de RESET/STOP o movimento pára de imediato;

- Seleccionar com busca de origem:
Neste caso ao premir a tecla de TESTE/ARRANQUE o alimentador vai fazer, em primeiro lugar, a busca de origem e pressionando a segunda vez a mesma tecla, este posiciona-se de acordo com a cota estabelecida, com a velocidade e aceleração estabelecidas na configuração. O ciclo descrito repete-se sempre que se premir a tecla de TESTE/ARRANQUE. Ao premir a tecla de RESET/STOP o movimento pára de imediato.

4.9.2.5. Programação do sistema

Este menu permite o acesso, com palavra-chave, ao menu de entrada e visualização de dados. A programação da produção de calços é realizada neste menu.

Parâmetros programáveis:

- Avanço/recuo, em mm, com duas casas decimais
Define a cota de alimentação. A aproximação das garras corresponde a cota negativa.
- Prensa com controlo / prensa sem controlo



Figura 76 – Menu de programação de dados

- Nº de repetições
Define-se aqui o nº de repetições para cada passo programado. Este parâmetro evita que se programem passos desnecessários facilitando-se a programação. O nº de repetições pode ir de 0 a 9999.
- Velocidade (em %)
Define-se aqui a velocidade para cada passo programado. Este parâmetro é extremamente importante nomeadamente na alimentação do início e fim da tira. A velocidade do passo é a que fica registada nas repetições do passo.

- Busca de origem
Este parâmetro deve ser programado no último passo de alimentação para compensar diferenças de cota entre o início de alimentação e o fim da mesma por cada tira. Este parâmetro só pode ser introduzido quando estiver programado o último passo de programação. Quando for seleccionado este parâmetro, a cota, velocidade e repetições são automaticamente colocados a zero.
- Fornecer tira/ não fornecer tira
Serve para programar o momento em que a tira deve ser fornecida ao alimentador.
- Forçar a abertura das garras/ garras em automático
Serve para programar a abertura das garras nos casos em que o alimentador não pode arrastar a tira e houver necessidade de reajustar a posição da cota de avanço.
- Passo seguinte / último passo
Serve para terminar o programa.
- Repetições iguais / repetições alternadas
Serve para programar o tipo de repetições do passo programado. As repetições iguais têm a mesma cota do passo e as alternadas, alternam o sinal da cota do passo programado.
- Prensa sim / não
Serve para programar inibir ou permitir o ciclo da prensa antes do passo programado ter efectuado o deslocamento. Assim por exemplo se num passo programarmos uma cota e um ciclo da prensa. Primeiro a prensa faz o ciclo e só depois é que o avanço se realiza.
- Funcionamento inicial prensa S/N
Permite que a prensa não funcione na primeira parte da sequência e serve para a primeira tira a ser introduzida.

De notar que no máximo só há a possibilidade de programar os passos de 0 a 19 por cada 100 ferramentas (calços): de 0 a 99. Por isso mesmo, um dos melhoramentos que se está a fazer com a Mecânica Exacta S.A. é a de aumentar a possibilidade de programar mais calços, pois normalmente podem-se utilizar num transformador calços entre os 17mm e os 160mm.

Exemplo de programação:

Dados:
Comprimento: 2000mm;
Largura: 30mm;
Peças de 110mm,
Distância entre centros do alimentador e ferramenta 440mm.

Valores de parâmetros:

DISTÂNCIA CENTRO FERRAMENTA CENTRO ALIMENTADOR = 440 mm											
DISTÂNCIA ENTRE FACES INTERIORES DA											
Tiras de 2000 mm e peças de 110mm (4,7 de desperdício)											
PASSO	COTA	PRENSA	REPETE		VELO %	BUSCA ORIGEM	TIRA	PRENSA SIM NÃO	ÚLTIMO SEGUINTE PASSO	GARRAS	SCMA CONTROLO
			Nº	TIPO							0 e -170mm
0	114,7	C/CONTROLO	0		25	NÃO	FORNECER	NÃO	SEGUINTE	FORÇAR	114,7
1	114,7	C/CONTROLO	0		25	NÃO	NÃO FORNECER	NÃO	SEGUINTE	AUTOMÁTICO	0
2	-155,8	C/CONTROLO	0		5	NÃO	NÃO FORNECER	SIM	SEGUINTE	AUTOMÁTICO	-155,8
3	114,7	C/CONTROLO	0		5	NÃO	NÃO FORNECER	NÃO	SEGUINTE	AUTOMÁTICO	-41,1
4	-114,7	C/CONTROLO	0		5	NÃO	NÃO FORNECER	NÃO	SEGUINTE	AUTOMÁTICO	-155,8
5	50,1	C/CONTROLO	0		99	NÃO	NÃO FORNECER	SIM	SEGUINTE	AUTOMÁTICO	-105,7
6	-50,1	C/CONTROLO	0		5	NÃO	NÃO FORNECER	SIM	SEGUINTE	FORÇAR	-155,8
7	114,7	C/CONTROLO	0		10	NÃO	NÃO FORNECER	NÃO	SEGUINTE	AUTOMÁTICO	-41,1
8	-114,7	S/ CONTROLO	11	ALTERNADAS	99	NÃO	NÃO FORNECER	SIM	SEGUINTE	AUTOMÁTICO	-155,8
RA	114,7										-41,1
RA	-114,7										-155,8
RA	114,7										-41,1
RA	114,7										155,8
RA	114,7										-41,1
RA	-114,7										-155,8
RA	114,7										-41,1
RA	-114,7										-155,8
RA	114,7										-41,1
RA	-114,7										-155,8
RA	114,7										-41,1
9	-114,7	C/CONTROLO	0		10	NÃO	NÃO FORNECER	SIM	SEGUINTE	FORÇAR	-155,8
10	114,7	C/CONTROLO	0		10	NÃO	NÃO FORNECER	NÃO	SEGUINTE	AUTOMÁTICO	-41,1
11	0	C/CONTROLO	0		10	SIM	NÃO FORNECER	NÃO	ÚLTIMO	AUTOMÁTICO	

Figura 77 – Valores de parâmetros

Através de uma folha Excel, como a da Figura 77, é realizado o programa para um calço. Neste exemplo, o calço é de 110mm. Uma das variáveis essenciais é o comprimento da tira pois é esta variável que vai originar o número de passos que a máquina vai efectuar.

Finalizada a folha de Excel, a programação é feita manualmente na máquina. Uma das futuras modificações será programar a modo de efectuar os calços, de modo que seja efectuada através de rede e não haja necessidade da programação manual.

Gráfico do seguimento da tira através de um desenho realizado em autocad:

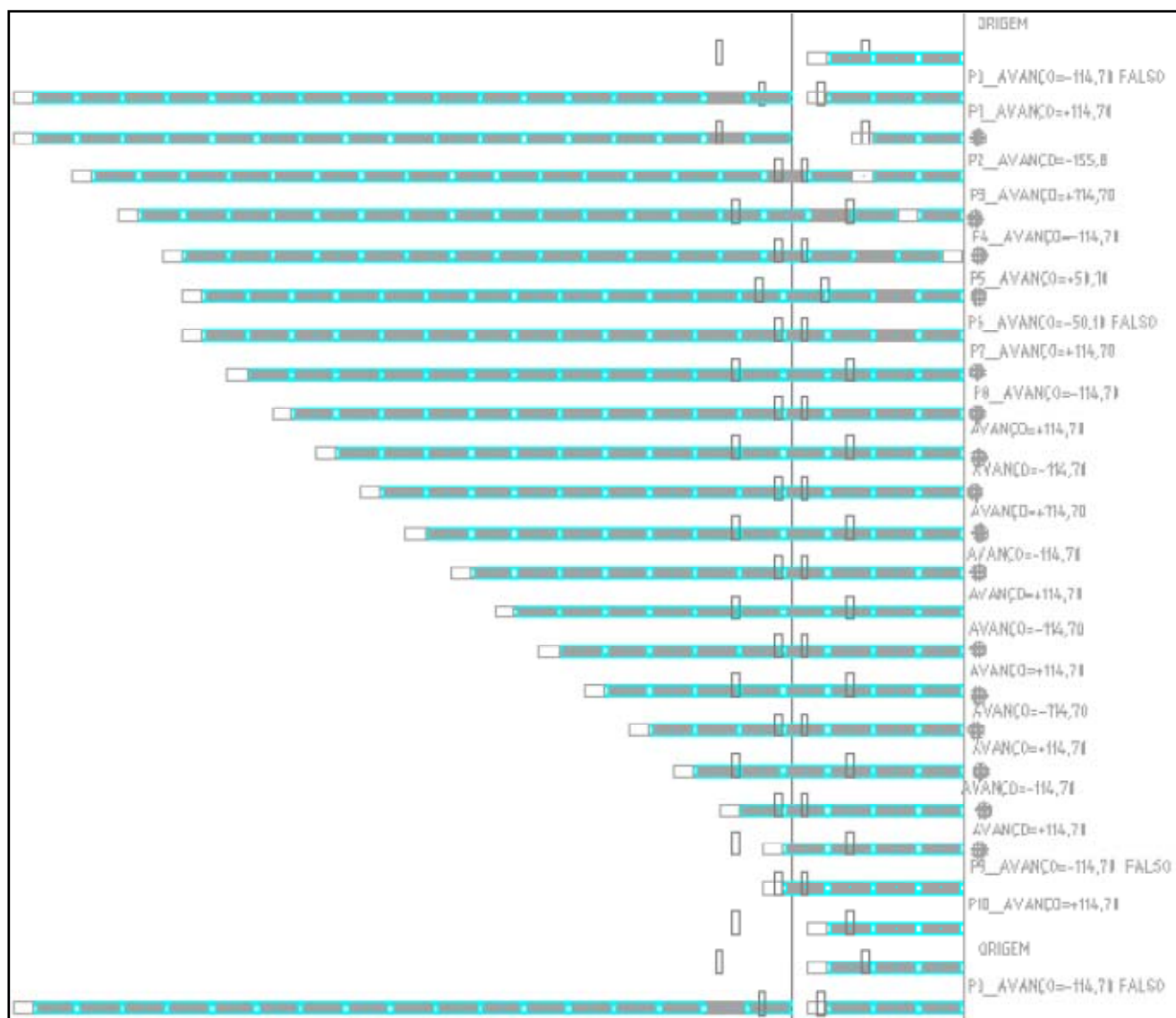


Figura 78 – Seguimento da tira através de um desenho realizado em autocad



Figura 79 – Vista geral da prensa

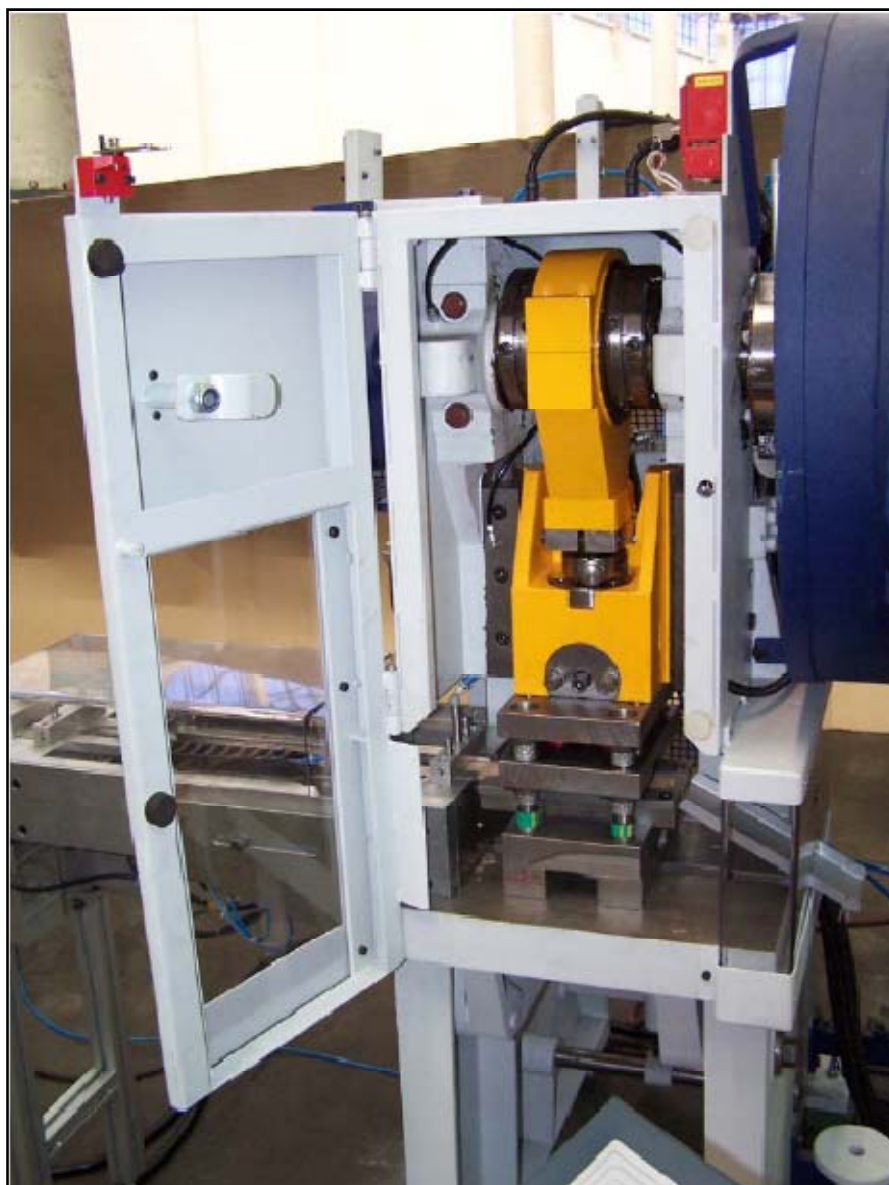


Figura 80 – Vista frontal da protecção

5. Conclusões

A influência do estado do óleo, do ponto de vista das suas características físico-químicas e dieléctricas, no estado dos isolantes sólidos do transformador (com especial destaque para o papel dos enrolamentos) e consequentemente no bom funcionamento dos transformadores são sobejamente conhecidas, apresentando uma importância crucial para a respectiva fiabilidade de funcionamento, assim como para a segurança e longevidade daqueles equipamentos.

Neste sentido a procura de um processo que seja favorável para o aumento de vida dos transformadores é sempre essencial numa grande empresa conceituada internacionalmente, como é o caso da Efacec.

Um processo sofre várias evoluções até estar completamente fiável, sendo que estes ensaios serviram para ficar nos registos da empresa em vista aperfeiçoar o processo de secagem por *Hot Oil Spray*.

Este estágio contribuiu para a formação do aluno em fase curricular, contribuindo para um bom relacionamento entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a Efacec.

6. Referências Bibliográficas

- [1] Martins, Maria Augusta G.; Manutenção de Transformadores de Potência. Tratamentos de Óleo e do Papel dos Enrolamentos, LABELEC – Grupo EDP, Setembro-Outubro 2001.
- [2] Junior, Jary Canarim Ribeiro e Gonzales, Carlos Guilherme; Tratamento e Secagem Transformadores e Reatores no Campo.
- [3] [Http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006D0899:EN:HTML](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006D0899:EN:HTML).
- [4] Harlow, James H.; Electric Power Transformer Engineering, CRC Press LLC, 2004
- [5] Du, Y., Zahn, M., Lesieutre, B. C., Mamishev, A. V. e Lindgren, S.; A Review of Moisture Equilibrium in the Paper-Oil System, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- [6] Oommen, T. V.; Moisture Equilibrium Charts for Transformer Insulation Drying Practice, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 10, October 1984.
- [7] Vergne, Jacques, Grob, Robert, Le Guennec, Patrick e Dhiba, Driss; Le vieillissement du papier dans les transformateurs de puissance, REE, Juillet 1995.
- [8] Du, Y., Mamishev, A. V., Lesieutre, B. C. e Zahn, M.; Measurement of Moisture Diffusion as a Function of Temperature and Moisture Concentration in Transformer Pressboard, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- [9] Oommen T. V.; Moisture Equilibrium in Paper-Oil Insulation Systems, IEEE, 1983.
- [10] Koch, Maik, Tenbohlen, Stefan e Stirl, Tobias; Advanced Online Moisture Measurements in Power Transformers, University of Stuttgart, Germany, 2006.
- [11] Oommen, T. V.; Moisture Equilibrium Curves – Use and Misuse, Doble Conference Paper, April 2003.
- [12] Le séchage par vapeur de solvant de transformateurs de puissance, Bulletin d'information technique paraissant à intervalles de temps variables destine aux clients et amis de Micafil S.A., Décembre 1977.
- [13] Umrath, Walter; Fundamentals of Vacuum Technology, Leybold, 1998.
- [14] Séchage de transformateurs par pulvérisation d'huile (Oil Spray), Bulletin d'information technique paraissant à intervalles de temps variables destine aux clients et amis de Micafil S.A.
- [15] Manual da prensa de excêntrico com embraiagem mecânica de ataque directo, Mecânica Exacta S.A., 2007.
- [16] Manual do colaborador, Efacec, 2008.
- [17] Formação de transformadores, Efacec, 2008.

- [18] Leite, J. C. A., Sousa, R. F., Silva, A. S., Gouveia, J. P. G. Sousa, A. G.; Simulação de secagem de milho (*Zea mays* L.) utilizando o modelo matemático de Thompson, Revista de Biologia e Ciências da Terra, 2005.
- [19] Souza, C. M. A., Queiroz, D. M., Filho, A. F. L.; Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa, Scientia Agricola, 2002.

Glossário

- 1 MVA – medida para os níveis de tensão (Mega Volt Ampere)
- 2 Galete – conjunto de enrolamentos constituintes de uma bobina
- 3 *Vanguard* – Equipamento portátil para medir resistências eléctricas de transformadores
- 4 Papel *Kraft* – usado em transformadores para dar rigidez mecânica e eléctrica
- 5 Rodelas – isolantes utilizados nos transformadores
- 6 Poder isolante – o mesmo que rigidez dieléctrica; valor limite de tensão aplicada sobre a espessura do material (kV/mm), sendo que, a partir deste valor, os átomos que compõem o material se ionizam e o material dieléctrico deixa de funcionar como um isolante
- 7 Envelhecimento – nível de degradação atingida pelo isolamento sólido
- 8 Celulose - é um polímero de "cadeia longa" composto de um só monómero (glicose), classificado como polissacarídeo ou carboidrato. É um dos principais constituintes das paredes celulares das plantas (cerca de 33% do peso da planta), em combinação com a lignina, com hemicelulose e pectina e não é digerível pelo homem, constituindo uma fibra dietética.
- 9 Grau de polimerização – número médio de anéis de glicose da molécula de celulose
- 10 ppm – partes por milhão
- 11 Humidade relativa – é a relação entre a humidade absoluta do ar (medida em g/m³) e a humidade da mistura do mesmo ar no seu ponto de saturação (tendo como base a mesma temperatura para as duas situações). Normalmente é indicada em percentagem.
- 12 Ponto de orvalho – refere-se à temperatura a partir da qual o vapor de água contido na porção de ar de um determinado local sofre condensação. Quando a temperatura está abaixo do ponto de orvalho, normalmente temos a formação de névoa seca ou neblina.
- 13 Autoclave – o mesmo que cuba; local onde se colocam as bobinas que vão ser secas com o processo de secagem
- 14 Bomba Roots – bomba de vácuo utilizada na instalação do *Hot Oil Spray*. As bombas de vácuo tipo Roots possuem grande capacidade de atingir baixas pressões [13].
- 15 Bomba de anel líquido – bomba de vácuo utilizada na instalação do *Hot Oil Spray*. Estas bombas são de desenho compacto, tendo aplicação em sistemas com vácuo inferior a 97% do absoluto, e com possibilidade de aspiração de líquidos e vapores [13].

- 16 Labelec – Labelec - Estudos, Desenvolvimento e Actividades Laboratoriais, S.A. é uma empresa de engenharia, nomeadamente de índole laboratorial.
- 17 PMS – ponto morto superior
- 18 PMI – ponto morto inferior
- 19 Calor específico – Calor específico de uma substância é a quantidade de calor que é necessário fornecer a essa substância para que a sua temperatura suba de grau centígrado.

ANEXO A: Curvas de equilíbrio da humidade

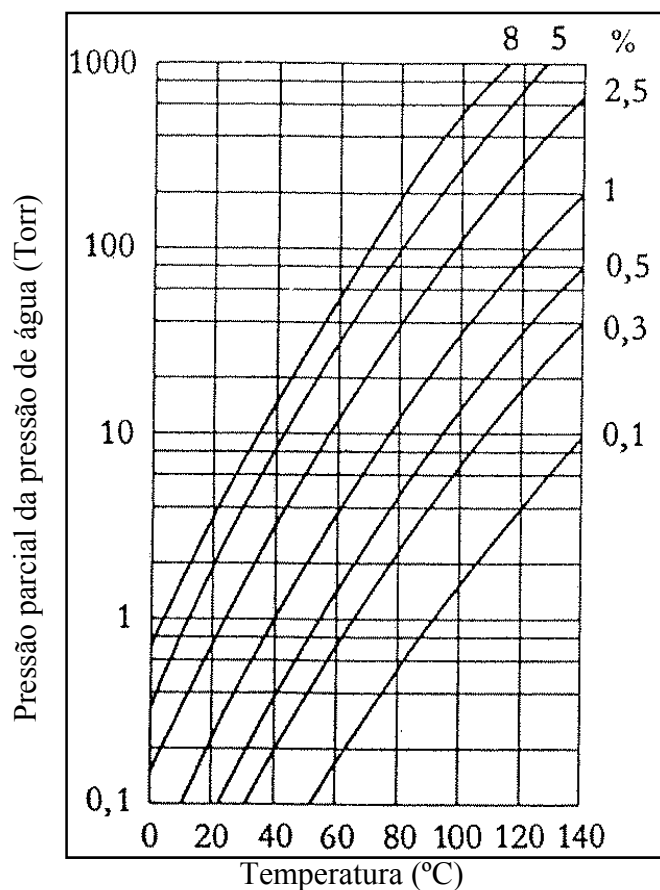


Figura 81 – Pressão parcial do vapor de água do isolamento em função da temperatura para diversos valores de umidade do isolamento

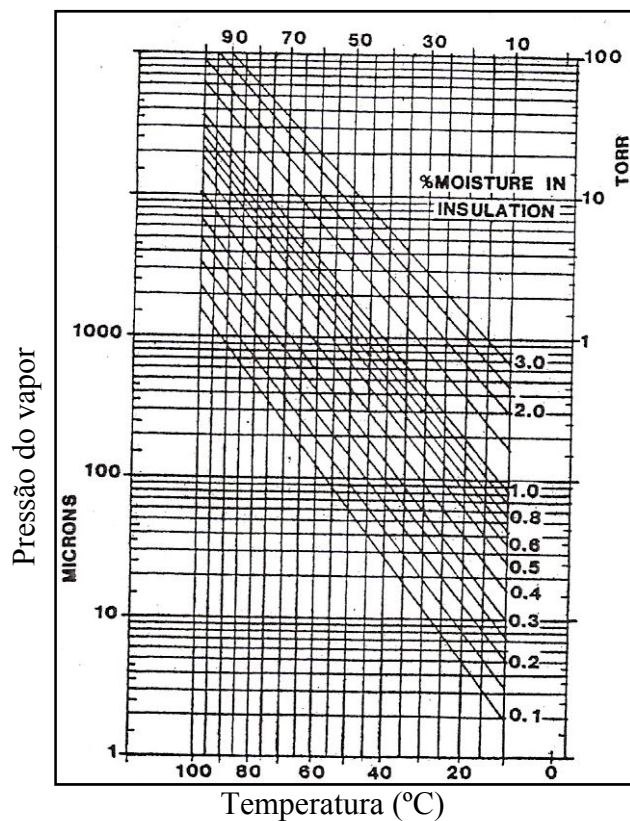


Figura 82 – Gráfico das curvas de *Piper*

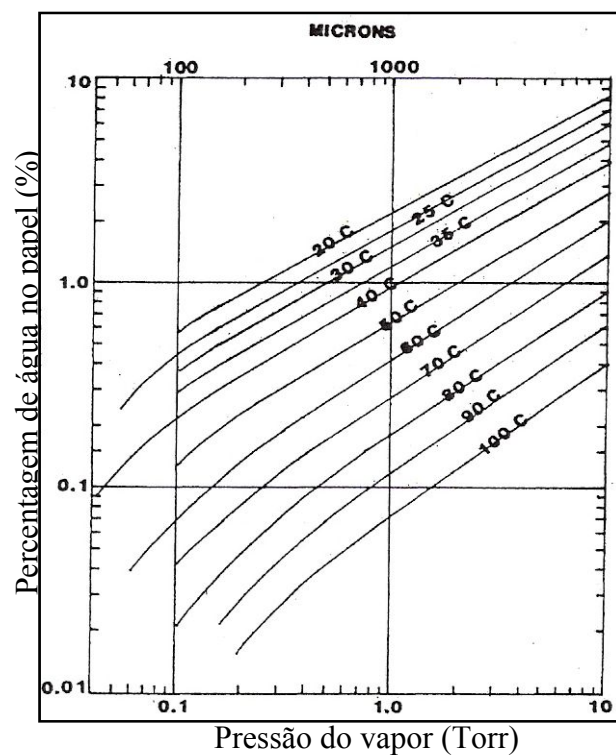


Figura 83 – Curvas de absorção do papel Kraft

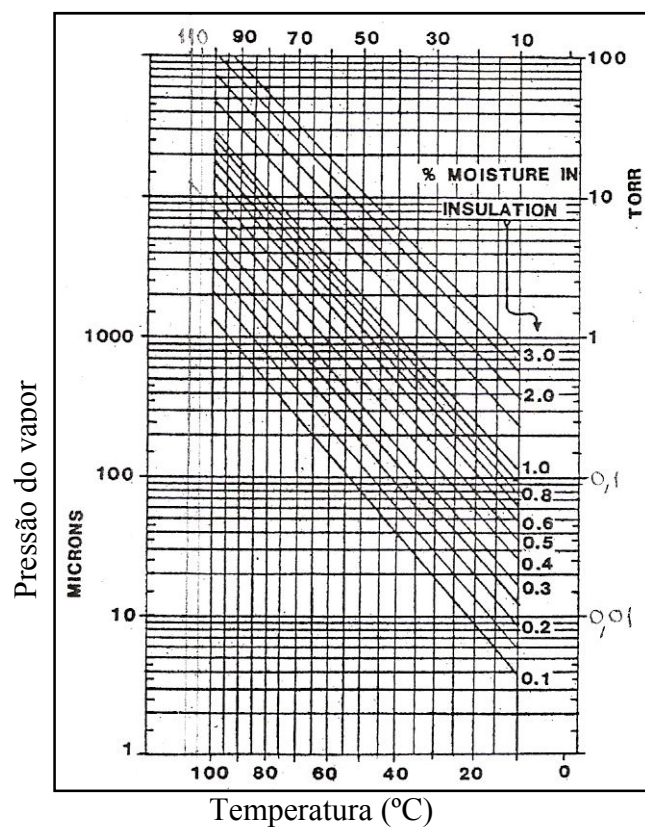


Figura 84 – Curva Pressão Vapor / Temperatura para o papel Kraft
(melhoramento das curvas da Figura 82 através da Figura 83)

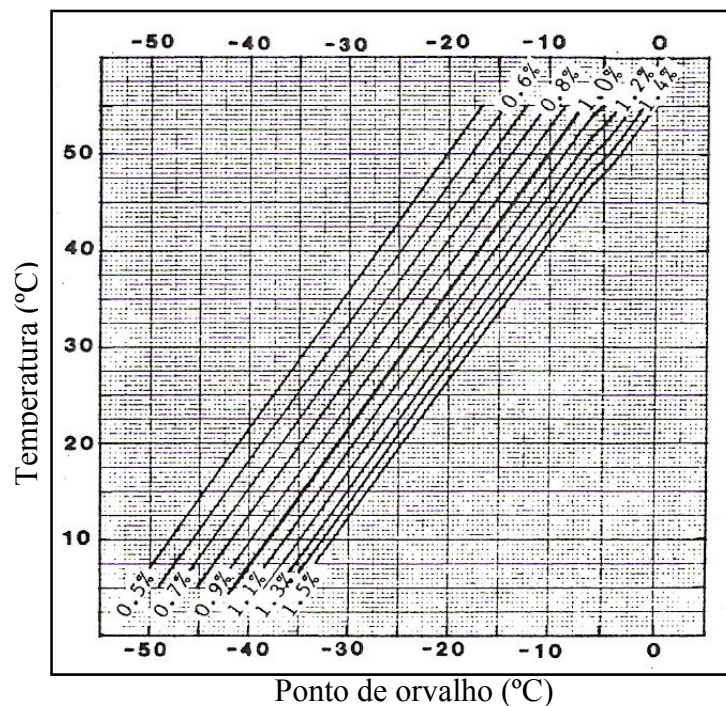


Figura 85 – Estimativa da humidade através da medição do ponto de orvalho

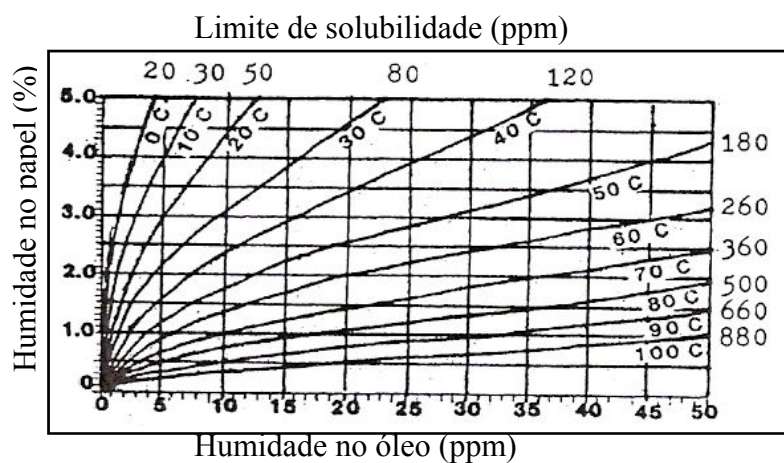


Figura 86 – Curvas de equilíbrio da humidade para sistemas óleo-papel

ANEXO B: Diagramas do processo *Standard*

ANEXO C: Diagramas do processo *Termo-Spray*